

ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN BASADOS EN
CAPACIDAD Y COBERTURA DE REDES
INALÁMBRICAS PARA LA INFRAESTRUCTURA
DE MEDICIÓN AVANZADA DE ENERGÍA
ELÉCTRICA

ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN BASADOS EN CAPACIDAD Y COBERTURA DE REDES INALÁMBRICAS PARA LA INFRAESTRUCTURA DE MEDICIÓN AVANZADA DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Adrián Eduardo Jaramillo Barreiro
Diego Fernando Torres Riascos
Egresados de la Carrera de Ingeniería Eléctrica
Facultad de Ingenierías
Universidad Politécnica Salesiana

Dirigido por:
Esteban Mauricio Inga Ortega
Director de Carrera de Ingeniería Eléctrica
Facultad de Ingenierías
Universidad Politécnica Salesiana



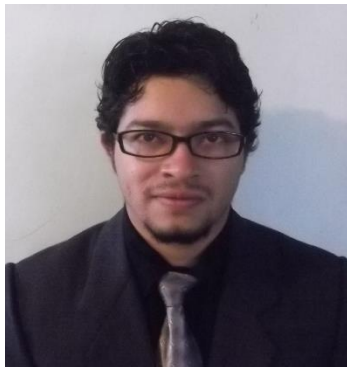
Quito - Ecuador

Adrián Eduardo Jaramillo Barreiro
Diego Fernando Torres Riascos

**ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN BASADOS EN CAPACIDAD Y COBERTURA
DE REDES INALÁMBRICAS PARA LA INFRAESTRUCTURA DE MEDICIÓN
AVANZADA DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

Universidad Politécnica Salesiana
Ingeniería Eléctrica

Breve reseña historia e información de contacto:



Adrián Eduardo Jaramillo Barreiro (Y'1991-M'03). Bachiller Técnico Industrial, especialidad Electricidad-Electrónica del Colegio Técnico Experimental Salesiano Don Bosco. Egresado de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Miembro Estudiantil del Grupo de Investigación en Redes Eléctricas Inteligentes-GIREI. Su trabajo se basa en técnicas de modelado y simulación matemáticos de redes inalámbricas de infraestructura de medición avanzada. Sus intereses de investigación incluyen Smart Grid, la asignación de recursos en redes malladas inalámbricas para la Infraestructura de Medición Avanzada y modelos de optimización matemática.

ajaramillob@est.ups.edu.ec



Diego Fernando Torres Riascos (Y'1991-M'01). Estudiante de Ingeniería Eléctrica, Estudiante miembro del Grupo de Investigación GIREI. Su trabajo se basa en técnicas de modelado y simulación matemática de redes inalámbricas de infraestructura de medición avanzada. Sus intereses de investigación incluyen la asignación de recursos en redes malladas inalámbricas para AMI.

Dirigido por:



Esteban Inga (A'1976-M'08). Ingeniero Electrónico de la Universidad Politécnica Salesiana; recibió su grado de Maester en Educación y Desarrollo Social en 2008 por la Universidad Tecnológica Equinoccial-Quito. En el presente trabaja para obtener su grado de PhD en Ingeniería de la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín-Colombia. Es coordinador del Grupo de Investigación en Redes Eléctricas Inteligentes - GIREI. Sus trabajos de investigación están relacionados a la Infraestructura de Medición Avanzada, Redes Celulares, Smart Grid. Actualmente es Director de Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana - Sede Quito.

einga@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda Prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2015 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO – ECUADOR

DEDICATORIA.

Adrián Eduardo Jaramillo Barreiro

Dedico este trabajo con mucho amor a mis padres, que nos han formado a mis hermanos y a mí como personas de bien, con principios y valores, por inculcar la perseverancia, responsabilidad y amor a lo que hacemos, por darnos a mis hermanos y a mí una educación de calidad y han estado pendientes de cada etapa de nuestras vidas, por estar presentes en las decisiones buenas y malas, y continuar apoyándonos a lo largo de nuestros estudios. A mis hermanos, incondicionales en consejos, apoyo, ayuda y conocimientos, sin ellos no lo hubiese logrado. A mi sobrino, quien llena de alegría mis días, es mi inspiración y me impulsa a no darme por vencido y a entregar lo mejor de mí. Con mucho cariño a mi familia, quienes con su apoyo, consejos, y palabras de aliento me ayudaron a culminar este proceso educativo.

A mis amigos, compañeros y docentes, quienes formaron parte de esta etapa de mi vida, a quienes debo mi respeto y consideración y conocimientos.

DEDICATORIA.

Diego Fernando Torres Riascos

Primeramente a Dios que siempre me mostro que las metas se pueden llegar a realizar con fe honestidad y respeto hacia los demas y hacia ti mismo con paciencia y esfuerzo.

A mis padres Carlos torres y Mercedes Riascos, que con su apoyo y esfuerzo depositado en mí, hacen posible el cumplimiento mis metas para llegar a ser un profesional.

A mi novia quien me brindo su compania incondicional su comprension durante todo el trancurso siempre apoyando mis decisiones e ideales.

A Javier, David, demás familiares y amigos quienes siempre estuvieron dándome ese impulso para seguir adelante brindándome apoyo y confianza para que no desmaye en mis aspiraciones y siga adelante con tesón y esfuerzo.

AGRADECIMIENTO.

*Adrián Eduardo Jaramillo Barreiro
Diego Fernando Torres Riascos*

Expresamos nuestros sinceros agradecimientos a los ingenieros que nos brindaron los conocimientos teóricos y prácticos durante nuestro paso por la universidad, también a nuestro tutor del trabajo de titulación, el Med Esteban Inga Ortega por brindarnos las herramientas, apoyo y confianza para culminar satisfactoriamente este trabajo.

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo, Esteban Mauricio Inga Ortega declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación *Algoritmos de optimización basados en capacidad y cobertura de redes inalámbricas para la Infraestructura de Medición Avanzada de Energía Eléctrica* realizado por Adrián Eduardo Jaramillo Barreiro y Diego Fernando Torres Riascos, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, Noviembre, 2015

Esteban Mauricio Inga Ortega

Nombres y apellidos completos del docente tutor

Cédula de identidad: 0102116043

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Diego Fernando Torres Riascos, con documento de identificación N° 1720748233, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor/es del trabajo de grado/titulación intitulado: *“Algoritmos de optimización basados en capacidad y cobertura de redes inalámbricas para la Infraestructura de Medición Avanzada de Energía Eléctrica”*, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Firma

.....

Nombre: Diego Fernando Torres Riascos

Cédula: 1720748233

Fecha: Noviembre, 2015

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Adrián Eduardo Jaramillo Barreiro, con documento de identificación N° 1722106166, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor/es del trabajo de grado/titulación intitulado: *“Algoritmos de optimización basados en capacidad y cobertura de redes inalámbricas para la Infraestructura de Medición Avanzada de Energía Eléctrica ”*, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Firma

.....

Nombre: Adrián Eduardo Jaramillo Barreiro

Cédula: 1722106166

Fecha: Noviembre, 2015

Índice

<i>INTRODUCCIÓN</i>	1
<i>Planteamiento del Proyecto</i>	1
1. <i>Estado del Arte</i>	5
2. <i>OBJETIVOS</i>	8
<i>OBJETIVO GENERAL</i>	8
<i>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</i>	8
3. <i>METODOLOGÍA</i>	8
4. <i>DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN</i>	10
Tecnología Wifi para Redes Inalámbricas de Sensores.....	11
Ubicación geo-referenciada de puntos de acceso	13
Agrupación de usuarios en una red inalámbrica	13
a) Método de agrupación K-means	14
b) Método de agrupación K-medoids	16
c) Método de agrupación basado en Programación Lineal Entera (ILP)	17
Formulación matemática del problema	19
a) Restricción de capacidad de cobertura hacia el usuario:.....	21
b) Restricción de capacidad de cobertura mínima de los AP.....	21
c) Planteamiento de la función objetivo	22
Análisis de resultados	22
5. <i>RESULTADOS ESPERADOS</i>	28
6. <i>ESTRATEGIA PARA LA DIVULAGACIÓN DE LOS RESULTADOS</i>	28
7. <i>SECTORES BENEFICIADOS</i>	29
8. <i>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</i>	29
9. <i>REFERENCIAS</i>	30

Índice de Figuras

Figura 1. Métodos de clusterización para un escenario de n usuarios y ubicación de puntos de acceso (AP)	2
Figura 2. Diagrama Despliegue de medidores inteligentes (usuarios) en la cartografía de Open Street Map.....	9
Figura 3. Diagrama de flujo del funcionamiento del algoritmo K means.....	15
Figura 4. Diagrama de flujo del procesamiento de variables y su corrección en etapas de instalación futuras	20
Figura 5. Agrupaciones requeridas en cada escenario representado por el número de usuarios para el método K means.....	23
Figura 6. Agrupaciones requeridas en cada escenario representado por el número de usuarios para el método K means.....	24
Figura 7. Agrupaciones requeridas en cada escenario representado por el número de usuarios para el método K means.....	25
Figura 8. Gráfica comparativa entre métodos de agrupación	26
Figura 9. Equidad en la distribución de SM en los diferentes clústers	27

Índice de Tablas

Tabla 1. Matriz de estado del arte.....	6
Tabla 2. Resumen e indicadores del estado del arte	7
Tabla 3. Resumen de características de las tecnologías inalámbricas	9
Tabla 4. Resumen de características de Punto de Acceso Cisco	13
Tabla 5. Tiempos utilizados por cada algoritmo para clusterizar	28

GLOSARIO

A

AMI: por sus siglas en inglés Advanced Metering Infrastructure. Hace referencia al sistema o conjunto de sistemas que tienen por función el realizar la medición, adquisición, recolección y análisis de información relacionada con el uso de la energía eléctrica. Existe una comunicación bidireccional entre dispositivos de campo (medidores) y dispositivos de administración propiciando la gestión de la información obtenida para tomar decisiones que optimicen, mejoren, y beneficien al correcto funcionamiento del sistema eléctrico de potencia. En orden del mencionado funcionamiento, la infraestructura perteneciente a las empresas que brindan los diferentes servicios consta de una parte física (hardware), de programas computacionales (software), de sistemas SCADA, sistemas de visualización para los consumidores, equipos de comunicaciones, etc.

C

CAPACIDAD: Característica propia de un dispositivo de comunicaciones para establecer un máximo número de enlaces con otros dispositivos de comunicación. Generalmente cada dispositivo tiene una capacidad limitada con el fin de proporcionar un adecuado funcionamiento en la red con velocidades de comunicación aceptables

CLÚSTER: Conjunto o Conglomerado de elementos que pueden tener o adquirir beneficios comunes. En un clúster de elementos de comunicación, se debe tener un elemento que reciba la información de todos los demás elementos y la transmita a otro dispositivo dándose una jerarquía en comunicaciones que tiene por objetivo un eficiente manejo de la información anejada.

COBERTURA: Área geográfica que deberá ser abarcada por una determinada infraestructura y/o dispositivo. Teóricamente se habla de un área de cobertura circular, cuyo radio está definido por el estándar de comunicaciones con el que se trabaje y su unidad de medida es metros o sus múltiplos y submúltiplos.

CONSUMIDOR: Es el destinatario final de los bienes o servicios eléctricos, denominado también como persona física o jurídica que adquiere la energía eléctrica para su propio consumo.

D

DISTRIBUCIÓN: Es la entrega de energía a los consumidores al por menor, abarca el área residencial, de alumbrado público y comercial.

DEMANDA ELÉCTRICA: Es la velocidad a la cual la energía es entregada a las cargas y los puntos programados de generación, transmisión y distribución.

DISTANCIA DE HAVERSINE: Ecuación que permite calcular la distancia entre dos puntos ubicados geográficamente sabiendo su latitud y longitud. Se realiza la suposición de que la tierra es esférica, por ende, la distancia de Haversine calcula distancias esféricas.

DIMENSIONAMIENTO DE REDES: Se refiere a la estimación de varios elementos como calidad de servicio, cobertura, capacidad, cantidad de estaciones base a implementar en una red, entre otros. Al ir de la mano de la planificación de redes, describe a dicha red en cuanto a tecnología, zona de despliegue de la misma, información topográfica, etc. Los objetivos a cumplir obedecen criterios técnicos y económicos, ya que se busca brindar un servicio de calidad al menor costo posible para la empresa distribuidora de energía eléctrica.

E

EFICIENCIA ENERGÉTICA: Se enfoca en los programas dirigidos a reducir la energía utilizada por determinados dispositivos de uso final, sin afectar al servicio prestado. Estos programas reducen el consumo global de electricidad en unidades de potencia sobre tiempo. El programa puede estar representado en ahorro y se lo consigue con el cambio de tecnología, es decir, con equipo más avanzado para producir el mismo nivel de servicios de uso final como: iluminación, calefacción pero con menos electricidad.

G

GEO-REFERENCIACIÓN: Es la técnica de posicionamiento espacial realizada por una entidad que trabaje con Sistemas de Información Geográfica (GIS) dentro de una localización geográfica definida en un sistema de coordenadas. En estos sistemas GIS se toman en cuenta imágenes de mapa de píxeles llamados objetos raster, así como también objetos vectoriales como puntos, líneas, polígonos, y otros elementos que se usan en la representación de objetos físicos.

K

K-MEANS: Del método de Conglomeración de particiones jerárquicas es un algoritmo comprobado que nos permite agrupar utilizando los centroides de masa, de los conjuntos a agrupar para lograr conjuntos o grupos más equitativos y uniformes.

K-MEDOIDS: Del método de Conglomeración de particiones jerárquicas es un algoritmo comprobado similar a k-means, su variación se basa en la asignación de un usuario representativo del grupo, el cual sería el centroide inicial por el cual se optaría la distribución uniforme del conjunto.

O

OPTIMIZACIÓN: Método final o acción de búsqueda dentro de las variables de un proceso con el cual tengamos una solución factible al problema propuesto.

M

MEDIDOR INTELIGENTE: Dispositivos de medición de servicios de energía ya sea eléctrica, gas, agua que permiten al usuario poder interactuar directamente con la empresa que presta el servicio de distribución de la energía garantizando que el usuario pueda elegir el estado de su servicio.

P

PROGRAMACIÓN LINEAL: Dicho procedimiento o algoritmo matemático permite resolver tediosos problemas indeterminados de ecuaciones lineales con funciones objetivo complejas.

R

RED INALÁMBRICA DE SENSORES: Llamadas WSN por sus siglas en inglés (Wireless Sensor Network). Como su nombre lo indica, la integran nodos conectados entre sí, cada nodo está compuesto de sensores, micro controladores y módulos de comunicación inalámbrica (recepción y transmisión), que cuando existe coordinación entre un gran número de nodos se puede tener con mayor detalle la medición de determinado parámetro físico (nivel, altura, humedad, temperatura, etc.) de un medio físico en el cual sea instalada dicha red.

S

SMART GRID: Red eléctrica inteligente, es conocida como la modernización de los sistemas eléctricos existentes correspondientes tanto a transmisión como a distribución, esto tiene por objetivo brindar una infraestructura eléctrica confiable y segura con capacidad de tolerar la creciente demanda de energía eléctrica. Abarca muchos temas desde la generación hasta la distribución, incluyendo tanto a las empresas de servicio (de generación o distribución) como a los usuarios conectados a la red haciendo uso de comunicaciones bidireccionales que propician un eficiente manejo, control y monitoreo de la energía eléctrica según criterios económicos, de sostenibilidad, de confiabilidad y que sean seguros para la vida (humana y animal) y para el sistema eléctrico de potencia.

SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN: Es la parte de la transmisión y las facultades del sistema eléctrico que está dedicado a la entrega de energía eléctrica al usuario final

SERVICIO AL CLIENTE: Se lo puede definir como la medida de actuación del sistema logístico para proporcionar en tiempo y lugar un producto o servicio.

SATISFACCIÓN DEL CLIENTE: Incluye elementos como marketing: producto, precio, promoción y distribución con la finalidad de satisfacer una necesidad concreta o creada.

W

WIFI: Red accesible y disponible para poder conectar dispositivos electrónicos de forma inalámbrica, todos los dispositivos electrónicos pueden acceder a redes de internet a través de un punto de acceso.

RESUMEN DEL PROYECTO

La infraestructura de medición avanzada AMI toma cada vez con mayor fuerza, dominio en el mundo de las redes inteligentes, brindando numerosas aplicaciones en diferentes campos: para salvar vidas humanas, propiedad pública y privada, para ofrecer un ambiente automatizado y de confort para los usuarios de dichas redes, entre otras. En este ámbito, la medición inteligente tiene un rol trascendental, y el dimensionamiento óptimo de una red para la misma aún más, por lo que el presente trabajo de titulación presenta un análisis detallado sobre métodos de optimización en cuanto a la forma de agrupar ítems y propone una comparación entre algoritmos de agrupación con el fin de determinar el método más eficiente para cubrir tanto en capacidad de enlazar medidores inteligentes - característica propia de cada AP (Access Point)- como en la cobertura - característica propia de cada estándar de comunicación, para una red de medidores inteligentes planteada basada en el estándar de comunicación Wifi. Como consecuencia de este análisis se pretende obtener las características de cada método analizados en las mismas condiciones tanto de cobertura como de capacidad expresadas mediante gráficas y establecer las conclusiones respectivas. Es por esto que esta investigación se centrará en definir, modelar y simular mediante los métodos de agrupación k-means, k-medoids e ILP (Programación Lineal Entera por sus siglas en inglés) expresados como algoritmos matemáticos en una red de quinientos (500) medidores inteligentes en un área residencial urbana a los cuales denominaremos usuarios, teniendo presente para cada método las restricciones y funciones objetivo de dicha red, garantizando un índice de cobertura del 100% de usuarios ubicados en los clústeres (agrupaciones) y de esta manera brindando una solución óptima en cuanto a tiempo, menor número de agrupaciones, y distribución equitativa de medidores en los diferentes grupos.

ABSTRACT

The advanced metering infrastructure AMI increasingly takes strength and domain in the world of smart grids, offering numerous applications in different fields: to save human lives, public and private property, to provide an automated environment and comfort for users such networks, etcetera. In this context, smart metering has a major role, and the optimal sizing of a network for it even more, so this paper presents a detailed degree of analysis optimization methods regarding how to group items and It proposes a comparison clustering algorithms in order to determine the most efficient algorithm to cover the capacity of link with smart meters - characteristic of each AP (Access Point) - and coverage - characteristic of each communication standard-, for a smart meters network based on wireless communication standard WiFi. As a result of this analysis it is to obtain the characteristics of each method analyzed under the same conditions both coverage and capacity expressed through graphics and establish the respective conclusions. That is why this research will focus on defining, modeling and simulation methods using K-means clustering, K-medoids and ILP (Integer Linear Programming) expressed as mathematical algorithms in a (500) smart meters network in an Urban residential area which we will call users, considering each method restrictions and objective functions of the network, ensuring a coverage rate of 100% of users located in clusters (groups) and thus providing an optimal solution in terms of time, fewer groups, and equitable distribution of smart meters in the different groups.

INTRODUCCIÓN

Planteamiento del Proyecto

El presente proyecto de investigación plantea un análisis de diferentes métodos de agrupación de ítems con la cual se intentará buscar el método matemático para una red de medidores inteligentes que mejor satisfaga las necesidades de diseño y se ajuste a las características propias del estándar de comunicaciones a utilizarse, que en nuestro caso, se ha escogido el estándar IEEE 802.11b conocido generalmente como Wifi. Como consecuencia de esta búsqueda del mejor método matemático, se puede obtener un mejor dimensionamiento de una red de medidores inteligentes, con reducción de costos en lo correspondiente a equipos, materiales, mano de obra, estructuras, etc.

Entre los métodos matemáticos de agrupación existentes, se ha escogido dos métodos de agrupación particional: K-means y K-medoids, y un método de optimización simplex basado en programación Lineal Entera (ILP), los cuales serán sometidos a escenarios iguales con el mismo número de usuarios. Según los resultados obtenidos en base a las mismas condiciones para cada simulación, podremos establecer comparaciones entre métodos en cuanto a mejor distribución de ítems por grupo, menor número de agrupaciones utilizadas, tiempo requerido para realizar las agrupaciones, obteniendo finalmente un método óptimo y más eficiente para el diseño de redes futuras.

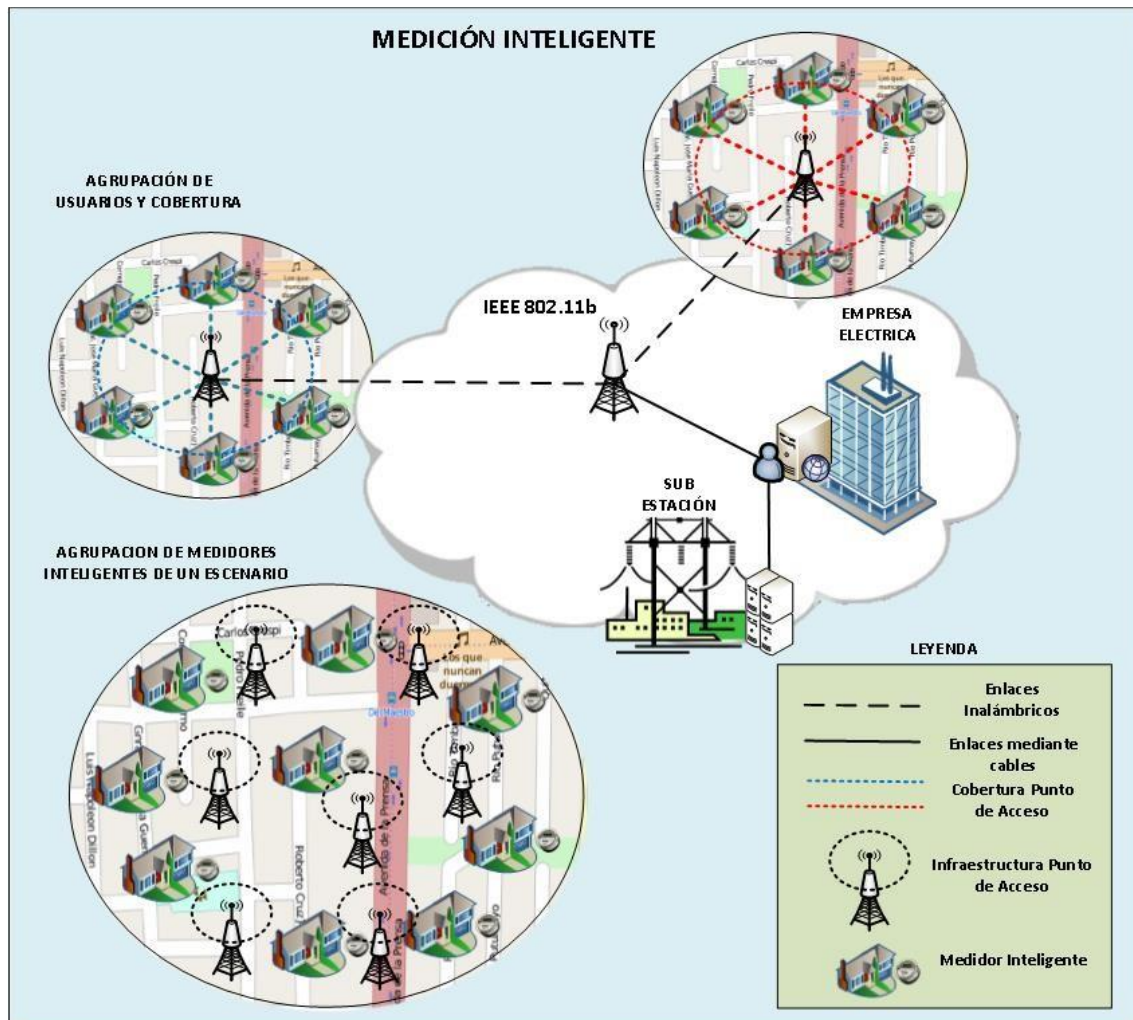


Figura 1. Métodos de clusterización para un escenario de n usuarios y ubicación de puntos de acceso (AP)

A medida que la demanda de energía eléctrica incrementa, se genera la necesidad de ofrecer por parte de una empresa de distribución mejores servicios al cliente, impulsando a la búsqueda de mejores soluciones tecnológicas debidamente analizadas y sustentadas técnica y económicamente de acuerdo a un escenario particular, que permita el intercambio de información de forma bidireccional y que en la actualidad tiene como servicio tradicional la emisión de planilla de consumo, resultado de una lectura humana y no gestionada en tiempo real.

El presente documento abarca la temática desde infraestructura de medición avanzada AMI (por sus siglas en inglés Advanced Metering Infrastructure), que es uno de los pilares sobre los que se sustentan las redes inteligentes SG (Smart Grid), hasta diferentes métodos de agrupación de ítems para implementarlos en un caso real. Y respaldados dichos temas básicos el tema central del presente estudio es proporcionar un análisis tanto individual como comparativo entre estos métodos de agrupación de objetos para abastecer las necesidades de una red localizada en un área urbana que utiliza el estándar de comunicación inalámbrica de uso masivo: Wifi, estableciendo bajo los mismos parámetros y escenarios

el algoritmo que sea el más eficiente para nuestro caso de estudio en cuanto a número de agrupaciones, distribución uniforme de medidores inteligentes en cada agrupación y tiempo que requiere para realizar estas agrupaciones según restricciones de cobertura y capacidad para admitir un determinado número de medidores con el fin de no alterar el correcto funcionamiento de la red inalámbrica ni sobrecargar a determinados grupos con mayor número de ítems (usuarios o medidores inteligentes).

Las redes Eléctricas Inteligentes SG (Smart Grid) son la evolución de las actuales redes eléctricas convencionales, ya que cuentan con una mayor producción de energía sostenible y se sirven de un conjunto de nuevas tecnologías en diferentes áreas interrelacionadas, con el objeto de contrarrestar los riesgos que presentan las redes convencionales y enfrentar adecuadamente los retos de la creciente demanda energética a nivel mundial.

A pesar de que el tema de la medición inteligente solo abarca una pequeña parte del universo de las redes inteligentes SG, su importancia radica en que constituye un cimiento para muchos otros temas dentro de las redes inteligentes. En medición inteligente se maneja el término AMI (Advanced Metering Infrastructure) que se refiere a la infraestructura que sirve de vínculo de integración entre la medición inteligente y las redes eléctricas inteligentes SG (Smart Grid) [1]. El principal objetivo de la medición inteligente consiste en brindar a las concesionarias una poderosa herramienta para realizar lecturas de forma automática en intervalos de tiempo regulares, y dar la posibilidad de generar un mejor sistema de demanda – respuesta DR (Demand Response) para controlar cargas críticas [2] en el menor tiempo posible.

Como lo indica [3], una parte de la medición inteligente, son las redes inalámbricas de sensores WSN (Wireless Sensor Network), componentes clave para un manejo óptimo de mediciones, lo que ha permitido desarrollar avances tecnológicos en cuanto a las aplicaciones que se han podido llevar a cabo, como monitoreo y transmisión de información pesada y aplicaciones de transporte de información. Usualmente estas redes constan de decenas de miles de nodos de sensores que monitorean variables en el entorno en el que se encuentran, comunicándose con nodos vecinos y en muchos casos realizando cálculos indispensables sobre la información que han recolectado. En una red, los sensores registran parámetros físicos tales como temperatura, presión atmosférica, tensión, entre otros; mientras que los medidores inteligentes miden distintos parámetros eléctricos como voltaje, corriente, potencia, etc., además de parámetros físicos, debido a que en muchas ocasiones estos sensores son incluidos en el medidor. Sin embargo los sensores y los medidores inteligentes se comportan de manera similar en cuanto a la recolección y transferencia de información. En dicha red, el instrumento de enlace entre los medidores inteligentes y las empresas eléctricas correspondientes es la tecnología disponible de uso masivo en la población, es decir, los canales de comunicación existentes, tales como Wifi [4], CDMA [5], LTE [6], canales en blanco de TV, entre otras. Para este estudio, nos centraremos en la tecnología

Wifi, debido a su costo, capacidad de atravesar barreras, alcance en áreas urbanas y rurales, simplicidad tecnológica, y su masificación en la población. La problemática a desarrollar se enfoca en el análisis de clusterización o agrupación de medidores inteligentes (SM) y además en la ubicación óptima de los puntos de acceso o Access Point (AP) en una red, con el objetivo de hallar el algoritmo con mejor funcionamiento para nuestro caso, y posteriormente, como consecuencia de ello, disminuir costos al implementar el menor número de equipos e infraestructura necesaria, facilitar la automatización de la red y llevar a cabo de manera remota el control y monitoreo de parámetros eléctricos de competencia de las distribuidoras como muestran [2] y [7], favoreciendo tanto al usuario como a la empresa proveedora del servicio a la vez que se posibilita una comunicación bidireccional entre cada medidor eléctrico inteligente y la concesionaria eléctrica.

Un AMI (Advanced Metering Infrastructure) se encarga de permitir la comunicación bidireccional entre dispositivos con el fin de controlar y monitorear los parámetros requeridos por el agente distribuidor de energía eléctrica desde los medidores inteligentes ubicados en las residencias de los usuarios [7]. Para entender la radical importancia de AMI en este trabajo y sus múltiples aplicaciones, y solo a manera de ejemplificación: en cuanto a la detección y toma decisiones sobre desastres, según [8], algunos estudios utilizan las redes de sensores inalámbricos WSN (por sus siglas en inglés Wireless Sensor Network) como una infraestructura de comunicación de su sistema de detección de desastres tales como la Localización superficial de Deslizamientos de tierra en redes de sensores inalámbricos. Por esto es que una red de sensores constituye una de las herramientas clave para predecir desastres, por lo que una red de comunicaciones constituye un problema clave para un sistema de detección de desastres, que permita salvar vidas.

1. Estado del Arte

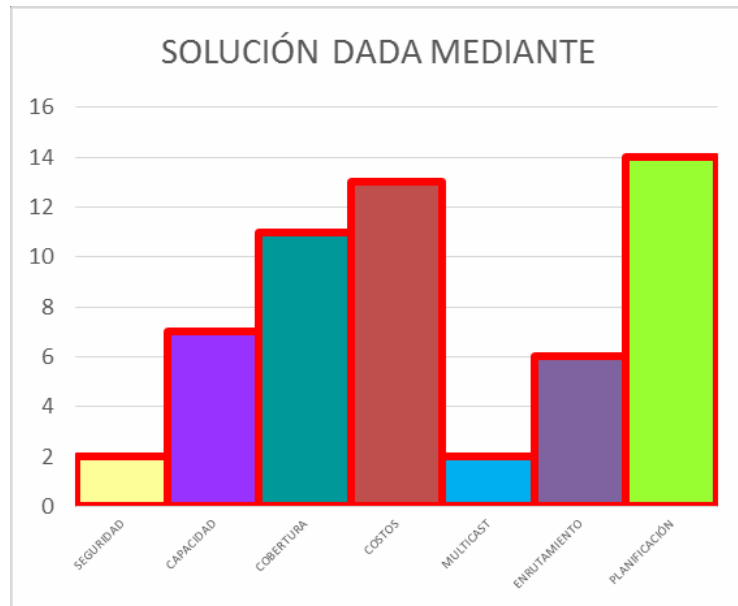
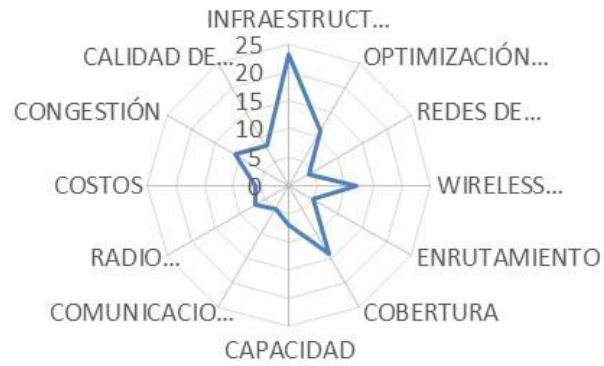
ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN BASADOS EN CAPACIDAD Y COBERTURA DE REDES INALÁMBRICAS PARA LA INFRAESTRUCTURA DE MEDICIÓN AVANZADA DE ENERGÍA ELÉCTRICA																																														
ITEM	DATOS		TEMÁTICA										FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO					RES TRICCION ES DEL PROBLEMA		PROPUESTAS PARA RES OLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUES TA																							
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	REFERENCIA	INFRAESTRUCTURA DE MEDICIÓN AVANZADA - (SMART GRID) "ESTADO DEL ARTE"	OPTIMIZACIÓN DE RECURSOS Y REUTILIZACIÓN DE INFRAESTRUCTURRA	REDES DE SENSORES (SENSOR NETWORKS)	WIRELESS SENSOR NETWORKS	ENRUTAMIENTO	COBERTURA	CAPACIDAD	COMUNICACIONES INALÁMBRICAS	RADIO COGNITIVA EN AMI	COSTOS	CONGESTIÓN	CALIDAD DE SERVICIOS (QoS)	MEJORAR LA CALIDAD DE SERVICIOS	DESCONGESTIONAR LA RED	CAPACIDAD	ENRUTAMIENTO	MINIMIZACIÓN DE COSTOS Bandwidth-Distance Product (Mbps x km/s)	CLUSTERIZACIÓN	MVNO	PLANEACIÓN	COSTO	ENRUTAMIENTO	CONDICIÓN DE CAPACIDAD	CONDICIONES DE COBERTURA	ILP	MINLP	ALGORITMOS, HEURÍSTICA o METAHEURÍSTICAS	USO DE ENERGÍA RENOVABLE	GENERACIÓN DISTRIBUIDA	SEGURIDAD	SCHEDULING	CAPACIDAD	COBERTURA	DELAY - LATENCY	COSTOS	MULTICAST	ENRUTAMIENTO	PLANIFICACIÓN					
1	2014	Wireless Sensor Networks for Smart Metering	\cite{Weigel2014 }				✗								✗	✗	✗					✗			✗						✗													✗		
2	2013	Optimal positioning of GPRS concentrators for minimizing node hops in smart grids considering routing in mesh networks	\cite{Souza2013 }		✗	✗		✗								✗				✗						✗		✗	✗					✗											✗	
3	2013	WEIGHTED TREE BASED ROUTING AND CLUSTERING PROTOCOL FOR WSN	\cite{Elhabyan2013 }	✗		✗	✗	✗					✗				✗	✗		✗					✗					✗											✗				✗	
4	2011	Self-sustainable energy efficient long range WiFi network for rural communities	\cite{Ab-Hamid2011 }	✗							✗			✗			✗															✗														
5	2010	Análisis de la calidad de servicio de las tecnologías CDMA 450 y Wimax para la comunicación en las parroquias rurales de los cantones Azogues, Cañar y Déleg brindado por la Corporación Nacional de Telecomunicaciones	\cite{Asitimbay2010 }	✗		✗		✗	✗	✗					✗	✗			✗	✗				✗	✗			✗				✗	✗					✗	✗						✗	
6	2013	Performance of low-cost LTE devices for advanced metering infrastructure	\cite{Ratasuk2013 }	✗	✗				✗	✗			✗	✗	✗	✗	✗				✗			✗	✗		✗	✗				✗						✗	✗		✗					
7	2014	Optimal Deployment of Cellular Networks for Advanced Measurement Infrastructure in Smart Grid	\cite{Inga2014 }	✗					✗										✗	✗					✗							✗							✗	✗		✗				
8	2010	Obtaining forewarning time for landslides using AMI associated wireless sensor network	\cite{Cheng-Jen2010 }	✗			✗							✗			✗	✗						✗	✗	✗						✗										✗				✗
9	2013	Smart meters in smart grid: An overview	\cite{Zheng2013 }	✗									✗																																	
10	2011	The applications of WiFi-based Wireless Sensor Network in Internet of Things and Smart Grid	\cite{Li2011 }	✗			✗		✗	✗	✗				✗	✗	✗		✗	✗						✗								✗											✗	✗

11	2012	Unsupervised locating of WiFi access points using smartphones	\cite{Koo2012}	✗	✗		✗	✗		✗	✗			✗	✗									✗			✗	✗	✗	✗			✗	✗						
12	2010	Distributed Shared Spectrum Techniques for Cognitive Wireless Radio Networks	\cite{Dubey2010}	✗			✗	✗			✗					✗							✗																	
13	2012	Estándares inalámbricos 802.11	\cite{Lobato2012}	✗						✗																														
14	2013	Puntos de acceso inalámbrico Cisco Small Business de la serie 500	\cite{Cisco2013}	✗																			✗																	
15	2014	Location Based ATM Locator System Using OpenStreet Map	\cite{chandra2014}	✗		✗	✗									✗						✗			✗		✗						✗							
16	2012	Smart clustering for multimodal WSNs	\cite{Medhat2012}		✗		✗		✗	✗		✗		✗		✗	✗	✗		✗		✗	✗	✗	✗		✗				✗	✗	✗	✗						
17	2012	K-Means Clustering in Wireless Sensor Networks	\cite{Sasikumar2012}		✗		✗		✗	✗				✗		✗						✗	✗	✗			✗							✗	✗					
18	2013	Data Aggregation in Wireless Sensor Network Using Node Clustering Algorithms - a Comparative Study	\cite{Nithyakalyani2013}		✗		✗	✗			✗			✗	✗	✗		✗				✗					✗							✗						
19	2015	Aplicación de las técnicas de agrupamiento para la distribución cuasi-óptima de una red híbrida WDM-TDM/PON encasada multinivel que da soporte a una Smart Grid o Smart City	\cite{Amoroso2015}	✗	✗		✗		✗	✗		✗			✗	✗		✗							✗	✗			✗	✗					✗					
20	2012	Grey Kmeans Algorithm and its Application to the Analysis of Regional Competitive Ability	\cite{Miao2012}	✗								✗																												
21	2010	Adaptive Transmission Range Assignment Algorithm for In-routing Image Compression on Wireless Sensor Networks	\cite{Tran-quang2010}				✗									✗										✗														
22	2011	Topology management techniques for tolerating node failures in wireless sensor networks : A survey	\cite{Feng}									✗																				✗								
23	2014	Wireless Communications and Virtual Operator for Residential Electric Metering	\cite{Inga2014}	✗	✗		✗		✗	✗				✗			✗		✗				✗	✗			✗			✗		✗		✗						
24	2015	Shortest Path for Optimal Routing on Advanced Metering Infrastructure using Cellular Networks	\cite{Inga2015}	✗	✗			✗			✗	✗			✗			✗		✗	✗	✗	✗	✗	✗		✗			✗	✗	✗	✗	✗						
25	2015	Optimum Deployment of FiWi Networks using Wireless Sensors based on Universal Data Aggregation Points	\cite{Peralta2015}	✗	✗			✗			✗					✗			✗				✗		✗		✗													
26	2013	Estrategias de negocio para medición inteligente acoplando energías renovables	\cite{Inga2013}	✗	✗						✗		✗	✗			✗				✗							✗	✗				✗		✗					
27	2014	Optimal Deployment of Cellular Networks for Advanced Measurement Infrastructure in Smart Grid	\cite{Inga2014}	✗				✗				✗				✗	✗								✗				✗	✗		✗								
28	2013	Comunicaciones celulares para medición inteligente de energía eléctrica en sistemas de distribución	\cite{Inga-Ortega2013}	✗					✗		✗								✗	✗					✗							✗								
29	2012	Redes de Comunicación en Smart Grid	\cite{IngaOrtega2012}	✗								✗								✗												✗								
30	2010	Web User Clustering Analysis based on Kmeans Algorithm	\cite{Gouveia}																							✗						✗			✗					
31	2014	Simulation Modelling Practice and Theory Modeling and experimenting combined smart sleep and power scaling algorithms in energy-aware data center networks	\cite{Diefenderfer2014}	✗				✗				✗					✗																							
			CANTIDAD:	23	11	4	12	5	14	7	5	7	6	11	8	12		12	7	7	5	6	8	5	7	10	3	1	21		2	2	0	7	11	0	13	2	6	14

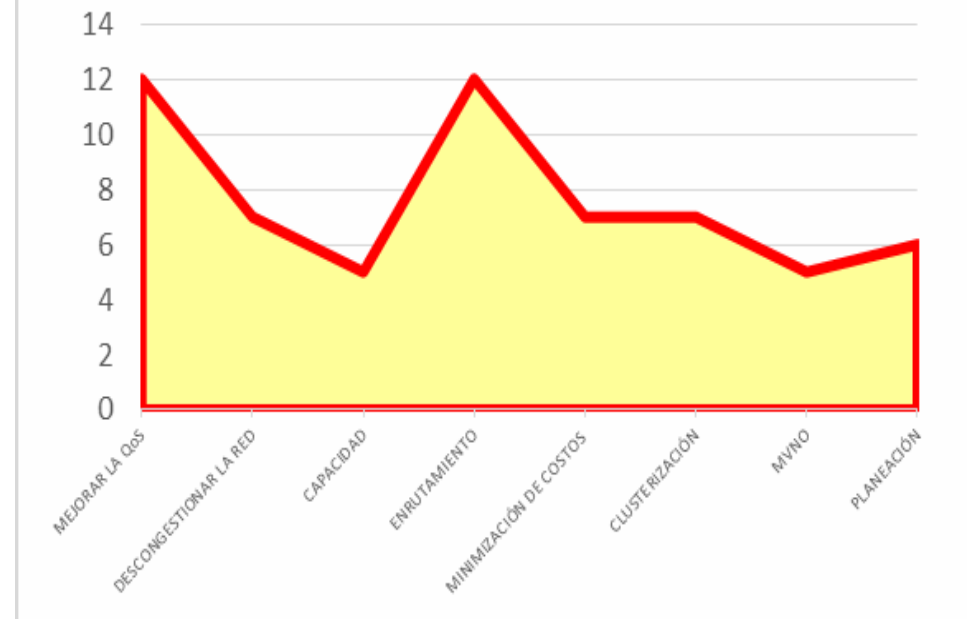
Tabla 1. Matriz de estado del arte

Tabla 2. Resumen e indicadores del estado del arte

TEMÁTICA



FORMULACIÓN DEL PROBLEMA



2. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Estudiar los métodos de agrupación propuestos para diferentes escenarios, cada uno con su respectivo número de usuarios, y de esta manera hallar un método óptimo para un correcto dimensionamiento de una red inalámbrica de medidores inteligentes, significando para los diseñadores e instaladores de redes un ahorro económico significativo por la reducción de materiales y trabajo, y a su vez propiciando un correcto funcionamiento de las redes instaladas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer escenarios, sometiéndolos a los distintos métodos de agrupación a analizar, con el fin de escoger el método que mejor se ajuste a los requerimientos del presente estudio mediante un análisis comparativo.
- Servirnos de diversos software informáticos para distinguir la topografía de la zona escogida y facilitar el despliegue virtual de los instrumentos con el objeto de realizar el estudio en la estructura de la red existente.
- Verificar el cumplimiento de restricciones planteadas para cada método de agrupación y realizar un cuadro comparativo.
- Evaluar el comportamiento de los métodos a medida que la demanda incrementa en los diferentes escenarios y poder determinar el método más estable frente al incremento del número de usuarios.

3. METODOLOGÍA

Como métodos y formas para analizar los casos antes explicados en lo referente a escenarios, restricciones y algoritmos matemáticos se ha previsto ciertos parámetros para obtener aproximaciones más exactas a la realidad, de esta manera podemos obtener: para analizar el problema de cobertura, primero debemos escoger la tecnología que más nos convenga en cuanto a costos económicos (por adquisición de dispositivos, construcción e implementación de estructuras para comunicaciones, mano de obra, herramientas y materiales, etc.) y a radios de cobertura, por lo que desarrollamos una tabla de resumen en la que constan los rangos de cobertura de las diferentes tecnologías inalámbricas para hallar la que mejor se ajuste a nuestro estudio.

Tipo	Tecnología	Nombre generico	Banda de frecuencia [GHz]	Alcance según Área de implementación [Km]		Capacidad [Nº usuarios]	Tipo de transmisión
				Closed Area	Open Area		
Smart Grid	IEEE 802.15.4g	PHY	2,4 [GHz]	0,01	0,02		
Cisco	Wifi	IEEE 802,11a	5 [GHz]	0,07	0,07	40-80	Antena/ Router / Punto de acceso
		IEEE 802,11b	2,4 [GHz]	0,1	0,2		
		IEEE 802,11g	2,4 [GHz]	0,05	0,4		
		IEEE 802,11n	2,4 [GHz]	0,05	0,5		
Celular	CDMA		450 [MHz]	90	48.9	95-50000	Antena
Celular	LTE		1,4 [MHz]	500	100	>200	Celda
			3 [MHz]				
			5 [MHz]				
			10 [MHz]				
			15 [MHz]				
			20 [MHz]				

Tabla 3. Resumen de características de las tecnologías inalámbricas

Además tenemos que definir los escenarios bajo los cuales se someterán los diferentes algoritmos matemáticos. Cada escenario tiene 50 usuarios más que el anterior, es decir, hay 8 escenarios de 50 usuarios cada uno, sumando un total de 400 usuarios en el último escenario.

Es necesario tener presente las restricciones a las cuales vamos a forzar a los algoritmos para que cumplan con los objetivos y condiciones deseadas como: a) una elevada densidad poblacional y su emplazamiento en zonas urbanas y rurales, b) una densidad poblacional bajo de zonas rurales, no uniforme y donde no existe infraestructura de redes eléctricas y c) la randómica ubicación de los puntos de acceso para que abarquen el 100% de usuarios según el dispositivo a utilizarse.



Figura 2. Diagrama Despliegue de medidores inteligentes (usuarios) en la cartografía de Open Street Map

Con el fin de obtener coordenadas geo-referenciadas de los usuarios y puntos de acceso (AP) se recurrirá al uso de la cartografía brindada por **www.openstreetmap.com**, que ofrece crear un archivo *.osm con la delimitación del área, de bastante utilidad en zonas urbanas pero no tanto en zonas rurales ya que no existe una delimitación para las zonas rurales, por lo que para este caso el despliegue deberá ser resuelto con otras opciones de geo-referencia, dada la ausencia de delimitación de las zonas rurales.

4. *DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN*

En el presente estudio se denominará usuarios a los medidores inteligentes, entendiendo que un medidor inteligente es un dispositivo que registra el consumo energético de un grupo de personas que comparten un espacio físico y una misma factura de electricidad; el medidor inteligente es uno de los dispositivos más usados en las redes inteligentes, capaces de recolectar información sobre el consumo energético, información sobre la distribución de la red, e incluso gestionar un consumo eficiente de energía brindando información y tomando acciones sobre las cargas existentes en el sitio donde se encuentran, significando un ahorro en las planillas del beneficiario de estos dispositivos. Estos medidores tienen la capacidad de comunicarse con otros dispositivos dentro de una red [9].

El camino para el intercambio y control de información se realiza mediante los estándares de comunicación más utilizados por la población, que para el desarrollo de este documento se ha escogido Wifi (IEEE 802,11b) con su respectivo radio de cobertura y capacidad de usuarios que pueden conectarse y comunicarse al mismo tiempo de forma bidireccional (enviar y recibir información simultáneamente).

Para obtener una correcta comunicación y gestión de la información censada, recibida y enviada es necesario contar con un sistema robusto que brinde la confiabilidad que se requiere para una tarea de la magnitud que se quiere abarcar mediante los sistemas de gestión de la información medida o MDMS (Meter Data Management System), los cuales cumplen con la función de almacenar información tal como localización, estado de cada polo eléctrico, entre otros datos relevantes para darles el uso que se requiera en un sistema que establece prioridades para los acontecimientos según las características que el sistema solicite con el fin de obtener resultados óptimos y confiables en tiempos convenientes para tomar las decisiones apropiadas y brindar soluciones a los problemas e inconvenientes en un tiempo muy bajo.

La principal preocupación en las redes inalámbricas de comunicación es el alto coste computacional medido en función de los tiempos de CPU para establecer prioridades y llevar a cabo la comunicación en el tiempo destinado y con la certeza de que la información que circule sea certera y verídica. Para

que esto se cumpla, [8] propone un método de detección de cambios e identificación haciendo uso de una medida de similitud local, lo cual determinaría en qué parte de la red se está distorsionando la información y de esta manera reducir errores y evitar inconvenientes tanto con los usuarios como con las empresas eléctricas distribuidoras.

Tecnología Wifi para Redes Inalámbricas de Sensores

Aunque en las redes inalámbricas de sensores se puede usar cualquier tecnología inalámbrica siempre que cumpla con ciertas características de costo, menor complejidad, menor consumo de energía, es predominante el uso de Wifi, ya que a diferencia de otras tecnologías como Zigbee, las limitaciones como alcance, cantidad y velocidad de información que maneja, capacidad de atravesar barreras, etc., son menores [10]. Por este motivo, la presente investigación tiene por objeto realizar el despliegue de AP en una red inalámbrica de medidores inteligentes (SM) utilizando la tecnología Wifi.

Los sistemas de posicionamiento mediante Wifi pueden ser de dos tipos o categorías según [11] basados en Radio Frecuencia (RF fingerprint) y basados en el posicionamiento de puntos de acceso Access Point AP, sin embargo algunos algoritmos utilizan ambos esquemas.

En un algoritmo basado en la huella de radio frecuencia, se divide un espacio en cuadrículas, en ellas los operadores realizan búsquedas, y con la información reunida se realiza un mapa de señal de radiofrecuencia de modo que, al realizar un scan mediante un dispositivo móvil se puede localizar cualquier punto del mapa de señales y se localiza la ubicación del dispositivo. Para mejorar la precisión del algoritmo se suele reducir el tamaño de la cuadrícula y se aumenta el número de escaneos. Un claro ejemplo que utiliza este método es el radar. Esto constituye un algoritmo superior al de posicionamiento de AP aunque supone un proceso de levantamiento de información más laborioso.

En el algoritmo basado en el posicionamiento de AP, las localizaciones de los AP están dadas previamente por el operador de la red, caso contrario, necesitarían ser descubiertas mediante el proceso de “war driving”, que es una aproximación en la que se pueden usar diversos métodos para encontrar la posición de un dispositivo móvil, entre estos métodos están situados el método de proximidad, donde un dispositivo móvil toma su posición lo más cerca de un AP, o los métodos mediante centroides ponderados donde se localizan los dispositivos móviles como centro de la posición de los AP que se encuentran visibles para este dispositivo.

El estándar Wi-Fi ha sufrido varias mejoras a lo largo del tiempo según lo ha requerido la industria, mejorando la eficiencia al transmitir información pesada, llegando así a una versión 802.11ac llamada Wi-Fi 5G o gigabit [12]–[14]. Esta versión alcanza velocidades de al menos 1.000 Mbps en la banda de los 5 GHz, con un alcance de cobertura superior a otras versiones, de modo que llega hasta un máximo de 90-100 metros mediante el uso de antenas internas, suficiente como para cubrir toda el área de una

casa de forma aceptable, utilizando dispositivos de la potencia reglamentaria. El estándar consiste en mejorar las tasas de transferencia hasta 1 Gbit/s dentro de la banda de 5 GHz, ampliar el ancho de banda hasta 160 MHz (40 MHz en las redes 802.11n), con una modulación de alta densidad.

Con estas altísimas tasas de transferencia, serán posibles nuevas vías de comunicación como la transmisión de vídeo sin compresión de alta calidad. Sin embargo, presentan una desventaja, pues su uso está limitado a zonas reducidas, ya que no permitirá superar obstáculos, dada su longitud de onda y frecuencia, pues a menor frecuencia mayor es la dificultad de atravesar barreras. Para ejemplificar, los estándares Wi-Fi de tipo b o g (2,4GHz) pueden atravesar barreras u objetos de hasta 13cm, en esta versión del estándar, la frecuencia manejada es mayor a 50 GHz- 60 GHz, permitiendo una mayor facilidad a atravesar barreras de mayor grosor.

Con el fin de satisfacer las condiciones antes propuestas y tener un dispositivo homologado, hemos consultado entre los puntos de acceso existentes en el mercado que tengan la conectividad con el estándar de comunicación escogido, y que nos brinde una capacidad de establecer enlaces amplia, de manera que no se necesiten tantos puntos de acceso y sea notorio el ahorro económico por todos los motivos anteriormente mencionados.

En cuanto al rango de alcance del estándar escogido IEEE 802.11b, encontramos en diferentes artículos, fichas técnicas y otros documentos como en [15], que el alcance de cobertura se sitúa en el rango de 100 y 200 metros, por lo que para nuestro caso de estudio se tomó un valor intermedio, es decir, 150 metros. De esta forma al realizar la optimización, las gráficas nos mostrarán el mejor sitio para ubicar a los puntos de acceso.

Recogiendo los datos que nos interesan de la ficha técnica del punto de acceso que cumple con nuestros requerimientos, podemos encontrar la capacidad total del artefacto, dimensiones y peso, y las comunicaciones que el dispositivo utiliza, e incluso el límite máximo de usuarios y puntos de acceso que pueden convivir en un grupo [16].


	Especificación	Descripción		
	Estándares	IEEE 802.11n	IEEE 802.11g	IEEE 802.11b
		802.3u	802.3af	802.1X
		802.1Q (VLAN)	802.11e	802.1D
		IPv4 (RFC 791)	IPv6 (RFC 2460)	
	Antenas	Antenas internas para instalación en techos o paredes		
	Dimensiones físicas	230x230x25 mm (ancho x profundidad x altura)		
	Peso	1,51 lb		
	Rendimiento inalámbrico	Hasta 450 Mbps de velocidad de datos		
	Soporte de usuarios	Hasta 64 usuarios conectados, 30 por cada radio		
	Cantidad de puntos de acceso	16		
	Clientes activos por grupo	480		

Tabla 4. Resumen de características de Punto de Acceso Cisco

Ubicación geo-referenciada de puntos de acceso

Al contar con un mapa real, no es posible trabajar con coordenadas rectangulares comunes. Es necesario utilizar una conversión para poder posteriormente realizar las agrupaciones anteriormente revisadas con distancias reales, basadas en georreferenciación, por lo que se utiliza el algoritmo de Haversine, para determinar las distancias entre los medidores inteligentes, los puntos de acceso y así determinar la cabecera de clúster con los fines de eficiencia ya mencionados.

La formulación de Haversine se presenta en [17] como se aprecia a continuación:

$$\Delta \phi = \phi_2 - \phi_1 \quad (1)$$

$$\Delta \lambda = \lambda_2 - \lambda_1 \quad (2)$$

$$a = \sin^2\left(\frac{\Delta \phi}{2}\right) + \cos \phi_1 \cos \phi_2 \sin^2\left(\frac{\Delta \lambda}{2}\right) \quad (3)$$

$$c = 2 \arctan\left(\sqrt{a}\right) \quad (4)$$

$$d = R \cdot c \quad (5)$$

Para esta formulación se asume un planeta Tierra esférico de radio R (R=6.371km), adicionalmente se considera las coordenadas esféricas de las ubicaciones de los ítems (para este caso de estudio por ítem nos referimos a AP), dichas coordenadas son longitud y latitud.

Agrupación de usuarios en una red inalámbrica

La agrupación de ítems en una red es conocida como clustering, es considerada como una de las áreas mayor investigadas en las redes inalámbricas de sensores (WSN) y consiste en concentrar un determinado número de dispositivos de similares características tales como sensores o medidores inteligentes con el fin de prolongar el tiempo de vida útil de la red, minimizar diferencias de medición entre los dispositivos agrupados, estimar la escalabilidad de la red, balancear cargas, disminuir el

consumo de energía en la transmisión de información que guarda una relación directamente proporcional con la distancia entre dispositivos (a mayor distancia de transmisión, mayor potencia requerida), entre

otros objetivos para aumentar la eficiencia de la red.

Usualmente en un clúster se selecciona un sensor al que se denominará cabecera del clúster (Cluster Head) que desempeñará la tarea de gestión y manejo de información tanto para la recepción desde otros medidores inteligentes como para su transmisión hacia un nodo receptor (sink node). La selección de la cabecera de clúster se la realiza según la distancia métrica entre la estación base y la misma, así como también entre medidores inteligentes, de modo que se busque el menor consumo de energía dado por la distancia de transmisión de información [3][18][19][20].

En las agrupaciones o clústeres, se puede dar la comunicación entre dispositivos de dos formas: intra-cluster o inter-cluster. En la Intra-cluster, el mensaje es comprimido e intercambiado entre los nodos incluidos y la cabecera del clúster; mientras que en la inter-clúster, la comunicación se da tanto entre las cabeceras de clústeres, como entre cabecera de cluster y estación base BS (Base Station). Esta selección de la cabecera de cluster se da principalmente por la razón: al ser la cabecera de cluster la única capaz de transmitir información hacia afuera de su correspondiente agrupación, se previene la colisión de información dentro del clúster debido a la exclusividad del canal de comunicación entre clústeres, es decir, este medio no se comparte entre nodos de otros clústeres, por lo que se asegura una confiabilidad en la comunicación y seguridad de que la información transmitida es correcta [18].

La acción de agrupar ítems permite a los nodos (sensores, medidores inteligentes, etc.) comunicarse entre sí y comunicarse con la cabecera de clúster en cortas distancias, lo que disminuye de manera considerable la potencia consumida y la potencia de pérdidas por transmisión. La cabecera de clúster tiene por función almacenar la información de los sensores y medidores inteligentes, y también de controlar y gestionar la información que se envía al nodo receptor mediante el enrutamiento multi-salto previniendo que se envíe al nodo receptor información redundante [18].

Entre los diversos algoritmos y métodos de agrupación, encontramos a los métodos K means, K medoids e ILP, mediante los cuales se pretende buscar el algoritmo óptimo de agrupación de medidores inteligentes según el número de usuarios, el número de grupos, y la correcta localización de los puntos de acceso (servirán como nexo de comunicación entre los medidores de la red y la empresa proveedora del servicio eléctrico).

a) Método de agrupación K-means

Los autores de [18][19] definen al algoritmo K-means como un método iterativo ampliamente usado en diversos campos, cualidad que no encaja con otros métodos, como el LEACH-C. K-means es un método de tipo determinístico simple, de alta confiabilidad, de iteraciones de convergencia rápida y que puede ser reagrupado durante los estados de falla que consiste en dividir una muestra en k grupos conocidos previamente, cada uno con un centroide asociado que es el centro geométrico de la agrupación [21].

El método trabaja con dos procedimientos complementarios: el uno se da asignando objetos a grupos según la cercanía de sus vectores de media de la variable medida sobre los elementos del grupo en el

sentido euclidiano. El segundo procedimiento se da mediante el cálculo de las medias del grupo de acuerdo con las asignaciones realizadas, culminando el proceso cuando no existen más movimientos de un objeto hacia otro grupo.

La meta principal de este método es disminuir la función objetivo denotado por suma de errores cuadráticos SSE (Sum Squares Error).

La dificultad al aplicar este método se da con la presencia de grupos asimétricos (diferentes tamaños y formas) o cuando los elementos de un grupo están cerca del centroide de otro grupo. Además K-means presenta la desventaja de que el proceso principal y el resultado se ve fuertemente afectado por la selección de los centroides iniciales.

El modo de operar de K-means se da al inicializar el proceso asignando k centroides (estos pueden ser objetos de una muestra o pueden ser producto de otro método de inicialización) y después se asignan los elementos del conjunto a agrupar al cluster con el centroide más cercano, iterando hasta que después de una iteración los centroides no hayan cambiado y el conjunto de datos corresponda a un grupo.

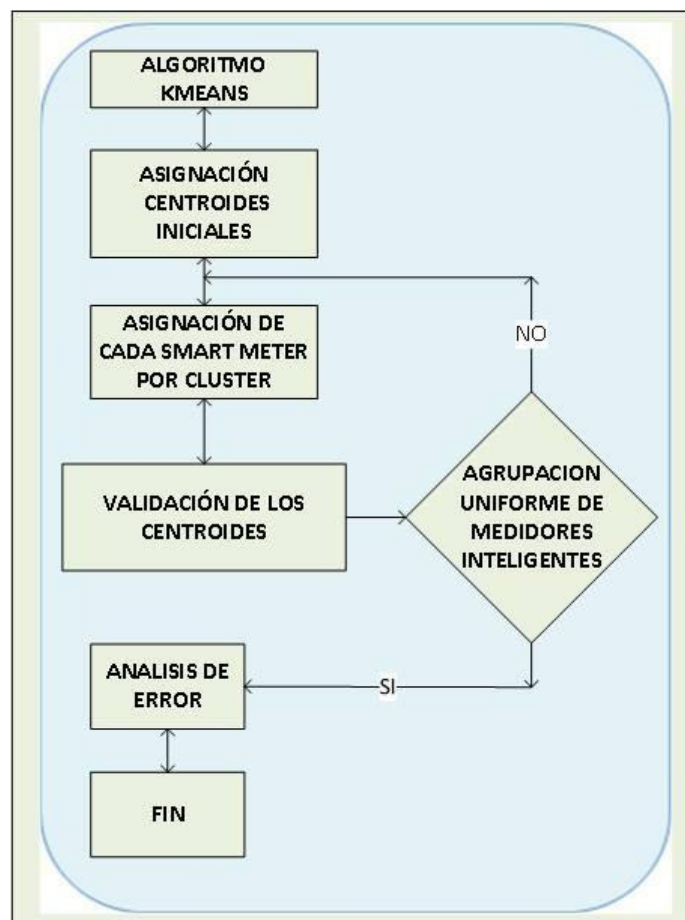


Figura 3. Diagrama de flujo del funcionamiento del algoritmo K means

La complejidad de este método de agrupación dependerá del número de objetos a agrupar, del número

de clúster asignados, número de iteraciones necesarias.

b) Método de agrupación K-medoids

Es una variación del algoritmo K-means, y muy similar al mismo en el sentido de minimización de función objetivo y del conocimiento previo de los k grupos. K-medoids es un algoritmo más robusto al ruido y a grandes valores de datos a comparación con K-means.

K-medoids tiene por función objetivo minimizar el criterio de error absoluto en lugar del SSE hasta que cada objeto representativo sea el medoide de la agrupación que llega a ser el objeto más céntrico de la agrupación obteniendo valores menos atípicos. El medoide se define como aquel objeto del grupo cuyo promedio de similitud al resto de objetos en el clúster es mínima.

Algoritmo de clusterización método k-medoids

Paso 1: Define $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$

Define $k = \text{num}(\text{Clusters}, K - \text{medoids})$

Set $m = \{m_1, m_2, \dots, m_{k-1}\}$, ir Paso 2

Paso 2:

Haga: $i=1$

$D = \text{dist}(x, m): k \text{ (clusters)}$

For $i = 1$ to k

$1=k \text{ (clusters)}$

$$\sum_{j=1}^k (x_j, m_j) = \text{Find}\{m_j, m_{j-1}\}$$

If $\text{Find}\{m_j, m_{j-1}\} \leq \text{Find}\{m_j, m_{j-1}\}$, ir a Paso 4

Else

$D_{m_j} = \text{Find}\{m_j, m_{j-1}\}$, ir a Paso 2

Paso 4: $m_j = (x_j, m_j)$, ir a Paso 5

Paso 5: Solucion = $(m_j, m_{j-1}) k \text{ (clusters)}$

Paso6: End

c) Método de agrupación basado en Programación Lineal Entera (ILP)

La resolución de problemas que necesitan grandes cantidades de variables y funciones objetivo dentro de la programación lineal pueden requerir que las soluciones sean del tipo entera [22], ya que la aproximación o el acercamiento de los límites dentro de la resolución de ecuaciones en el universo de los números reales no puede satisfacer las funciones objetivos y alcanzar el óptimo dentro del problema planteado [23],[24]. El principal problema del tipo de tratamiento de un problema de ecuaciones del tipo discreto a tipo continuo viene a ser la gran cantidad de tiempo que le toma encontrar un óptimo frente a un problema planteado[25] .

Este tipo de algoritmo se puede abordar desde dos conceptos fundamentales:

1.-Si la solución que se encuentra dentro de una parte del problema puede satisfacer las restricciones esto convierte a la función objetivo una solución factible del problema planteado originalmente, es decir, una cota inferior, que posiblemente sea solución al problema en general y cota inferior para todas las demás funciones objetivo[19].

2.-Si la solución que se encuentra satisface una de las funciones objetivo dentro del problema y esto puede terminar en que se requiera agregar restricciones adicionales para poder alcanzar el valor de la función objetivo esto hace que la solución sea una cota superior para todas las demás funciones objetivo[20].

El problema de cobertura más capacidad de un número n de usuarios para lo cual se ha determinado un número m de puntos de acceso, los cuales estarán sujetos a una solución mediante métodos de programación lineal para obtener la solución óptima frente a todas las funciones objetivo, los enlaces trazados entre cada punto de acceso y cada usuario vienen dados por la distancia de Haversine con los cuales hemos trazado enlaces entre puntos de acceso y usuarios.

Algoritmo de Optimización para Estaciones Base según Capacidad y cobertura

- 1: Define (img =openstreetmap) Area Coverage
- 2: Define $U1, U2 (X_{si}, Y_{si})$: Smart Meter Position
- 3: Define $S1, S2 (X_{ebi}, Y_{ebj})$: Base Station Position
- 4: Graph $[(X_{si}, Y_{si}), (X_{ebi}, Y_{ebj})]$ Init
- 5: Define $R ([r1, r2, r3, r4, r_{n-1}])$ Ratio Base Station
- 6: Step 1:
If length $[R] = \text{length}(X_{ebi} \parallel Y_{ebj})$
- 7: Define:

```

Porc = 0.90 %
Cap= num_min_users || max_num_users
    max_num_AP|| max_num_AP
8: Define: Restriction min_num_AP
For j=1: length (U)
    For j=1: length S)
        min_num_AP=cap (length (U))
    End For
End For

9: Define: Restriction Capacity_AP
For j=1: length (U)
    For j=1: length (S)
        max_num_users =Porc*length(S)
    End For
End For

10: Define: Connection_Users_AP
If Dist (i, j) ≤ratio
For j=1: length (U)
    For j=1: length (S)
        Site active =1
    Else
        Site passive=0
    End For
End For

11: For i=1: length(R)
Dmax_BS=0.150 Distance maxima of technology

$$\frac{D_{max\_BS}}{6.3728 \frac{180}{\pi}} + \frac{D_{max\_BS}}{6.3728 \frac{180}{\pi}}$$

Graph (Circle [Rs (Xbi, Yebj)])
Circle coverage Base Station
End For

```

- 12: Step 2:
- 13: Graph problem_lp_init
- 14: Save (problem_lp_init)

```

15: Open (Lp_solve)
16: Run (problem_lp_init)
17: Solution (problem_lp_final)
18: Open (problem_lp_final)
19: For i=1: length(R)
    Graph (Circle [Rs (Xbi, Ybj)])
    Circle coverage Base Station
    Graph (links (problem_lp_final [(Xbi, Ybj), (Xsi, Ysi)])
    Links Users with Base Station
    End For
20: Step 3:
21: Save scenario_ Optimized
22: End

```

Formulación matemática del problema

Dada una problemática donde se necesita satisfacer la cobertura para un número determinado de usuarios existen funciones objetivo para la solución del problema que nos pueden ayudar a cumplir con el objetivo de estudio integrando la cobertura con las restricciones planteadas[26],[27].

El siguiente diagrama de flujo muestra el proceso de formulación de la problemática de nuestra investigación, en el cual tanto a los datos de entrada como a las incógnitas se asignan variables para su procesamiento digital, una vez asignadas estas variables, ingresan al algoritmo correspondiente tanto para geo-referenciación como para los métodos matemáticos de optimización para la agrupación de medidores inteligentes. Como resultado de estos algoritmos, obtenemos datos optimizados listos para ser llevados a su aplicación, donde se analiza el error entre los resultados teóricos con la práctica, para realizar los cambios pertinentes y corregir el problema. De esta manera las empresas que brindan servicios estratégicos como es el de la energía eléctrica pueden saber en qué parte del sistema existen pérdidas y de esta manera podrán corregir estos problemas en un tiempo aceptable para no tener pérdidas energéticas ni económicas considerables.

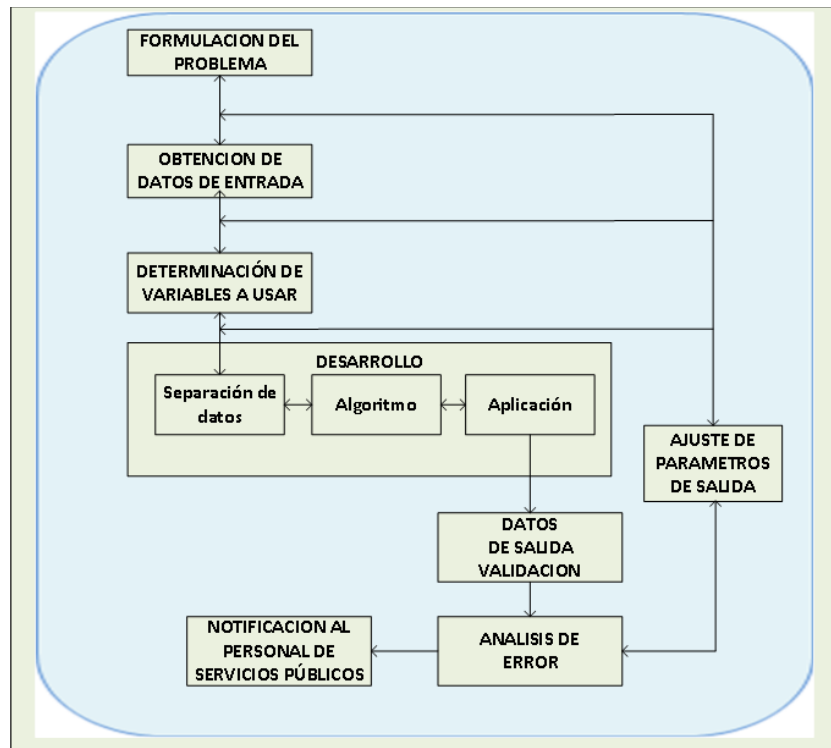


Figura 4. Diagrama de flujo del procesamiento de variables y su corrección en etapas de instalación futuras.

A continuación se formularán las restricciones y funciones objetivo dentro de una ecuación para resolver el problema de optimización que se plantea dentro de la propagación de toda la infraestructura para medición inteligente[28]. Dentro de las variables a tomar en cuenta a lo largo del proceso de optimización tenemos:

(Pr) Potencia de radiación

Ubicación de (SM) Smart Meter

Lugares candidatos para (AP) Access Point

Canal de operación de los Access Point (Medio de difusión frecuencia)

Escogido un área urbana donde se distribuirán 400 usuarios ubicados y agrupados por zona donde se colocarán un número máximo de 15 Access Point del cual se partirá para resolver el problema de cobertura para estos 150 usuarios tomando en cuenta la probabilidad de cobertura del 90% (probabilidad característica de una buena cobertura), la capacidad de usuarios[14].

Ahora dada la ubicación aleatoria de los usuarios y los Access Point se tiene que definir los conjuntos y las variables a lo cual pertenecerán dentro del algoritmo de solución para un conjunto de $\{N\}$ Usuarios que se ubican aleatoriamente en el área dispuesta de estudio tendremos un conjunto M de Access Point, es decir, un número definido de posibles sitios candidatos donde se ubicará el Access Point, también se debe tomar en cuenta que la ubicación que se realiza del Access Point se definirá como un sitio posible

o un sitio candidato para el caso de estudio y dentro del algoritmo las variables a la que estarán sujetas será 1 y 0 sitio pasivo , sitio activo[29].

Para que el Access Point se defina como sitio activo este deberá habilitarse para lo cual el usuario será cubierto dentro de una distancia R (radio) del Access Point[30], [31].

Encontrar el número mínimo de sitios activos de AP para alcanzar un % mínimo de cobertura para el conjunto de usuarios.

Una vez ubicado los sitios candidatos donde los puntos de acceso podrían ubicarse se crea una matriz donde se almacenara cada sitio candidato posible se definirá como (x_i, y_i) , y el número de access point dependerá de la cobertura de la tecnología la capacidad de transmisión de la antena

$$S = \{s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6, s_7, \dots, s_n\}$$

La ubicación de los usuarios para el caso de estudio se realizará dentro de una área específica para el cual se definirá un número finito de usuarios a partir de lo cual se comenzará a resolver la optimización como un problema de cobertura y capacidad.

La posición del sitio candidato i-ésimo está dado por:

$$(x_i, y_i)$$

La posición usuario j-ésimo está dado por:

$$(x_j, y_j)$$

Si el usuario j es cubierto por el AP i, entonces el valor es 1 de lo contrario el valor es 0.

$$\alpha_{i,j} \in \{0,1\}$$

Para cada sitio candidato si se define la cantidad:

$$a_i \in \{0,1\}$$

Si el valor que nos retorna la función es 1 entonces indicará que el sitio candidato i es un sitio activo.

$$c_j \in \{0,1\}$$

Si el valor que nos retorna la función es 1 entonces indicará que el usuario es cubierto dentro del radio de cobertura por al menos un sitio candidato.

a) Restricción de capacidad de cobertura hacia el usuario:

Dado:

$$c_j \leq \sum_{i=1}^n \alpha_{i,j} \cdot a_i \quad (1)$$

Esta ecuación es una restricción dentro del problema de optimización dado que si se tiene al final de la función 0, esto quiere decir que el usuario no es cubierto por lo cual dentro del algoritmo se realizara otra iteración hasta que se cubra el porcentaje mínimo de usuarios cubiertos establecidos dentro del algoritmo para lo cual se plantea otra restricción dentro del algoritmo[32], [33].

b) Restricción de capacidad de cobertura mínima de los AP:

Dada la ecuación siguiente:

$$\frac{1}{N} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{N} \geq P(\%) \quad (2)$$

Esta restricción nos permite determinar de manera objetiva el porcentaje de usuarios que nosotros deberíamos cubrir de acuerdo al área donde nosotros despleguemos la infraestructura está sujeto a las condiciones de cobertura requerida.

c) Planteamiento de la función objetivo

Dado que el objetivo del problema planteado es minimizar el número de sitio candidatos que sean activos y abastezcan al mayor número de usuarios dentro de las zonas desplegadas entonces se plantea la siguiente ecuación[33].

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \frac{1}{N} = 1 \quad (3)$$

Dentro de la formulación del problema se considera un conjunto de N usuarios (medidores inteligentes) que serían los encargados de enviar información hacia el concentrador central por medio de una conexión inalámbrica a una radio base (BS) estación base cada punto de acceso o BS tiene definida un número de M usuarios a los cuales prestar cobertura o agruparlos por cada radio base, clusterizar dentro del área de cobertura [34], [35]. El área abarcada de los puntos de acceso dependerá de la potencia para la cual está configurada la tecnología en algunos casos deberá ser ajustable, es decir, dada la ubicación de los usuarios dentro de la zona establecida es aleatoria por dicho motivo habrá usuarios que estén en sitios más lejanos que otros.

Dado que este estudio de cobertura, capacidad y ubicación de los puntos de acceso se trata de un problema de optimización entonces se toma en cuenta que los costos de instalación de la infraestructura serán CBS en general para todas las estaciones base. Ahora la interconexión entre las radio bases una vez encontrada donde sería la ubicación más óptima para su instalación sería de cables de fibra óptica que aseguraría un envío de información eficaz y óptimo entre las BS [13][12].

Mediante k-means se realiza una clasificación no jerárquica sujeta a las restricciones y funciones objetivo dentro del caso de estudio, es decir, se forman grupos de usuarios, dentro de un método iterativo, se observa el índice de dispersión de los usuarios mientras menor sea el índice de dispersión al contrario sea mayor la distancia entre grupos o se denomina también a esta distancia la distancia entre centroides, es decir, si mayor es la distancia se puede concluir que es más probable que esta sería la solución cercana a la función objetivo[36].

Análisis de resultados

En esta sección se analizarán los resultados de las simulaciones computacionales por cada método y la

solución óptima al problema de cobertura y capacidad utilizando programación lineal LP.

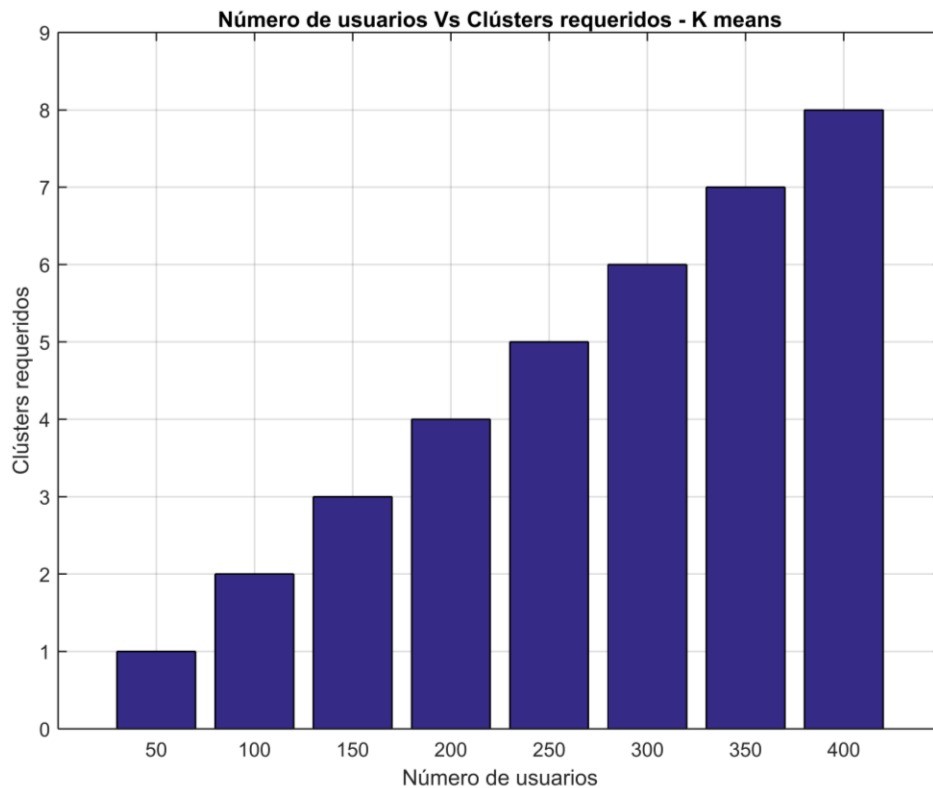


Figura 5. Agrupaciones requeridas en cada escenario representado por el número de usuarios para el método K means

En la figura 5 se muestra el comportamiento del algoritmo K means según aumentan los usuarios. Recordemos que los escenarios reúnen de 50 en 50 usuarios, es decir, el eje x representa a los escenarios según el número total de usuarios que abarca. Para cada caso, se ha aumentado una restricción, que nos ayudará a calcular el número mínimo de agrupaciones o clústers necesarios para cumplir con las condiciones de capacidad de los puntos de acceso, y que no rebase la distancia máxima de cobertura propia del estándar de comunicación. En este sentido lo que se pretende es utilizar el mínimo de recursos, abarcando el mayor número de usuarios y garantizando un normal y correcto funcionamiento de la red como tal.

El algoritmo K means recalcula la posición de los centroides que es el lugar donde se ubicaría el punto de acceso ya que es el punto que tiene conexión con todos los elementos de esa red, tal como lo haría el punto de acceso. En las simulaciones computacionales se estableció la condición de abarcar al 100% de usuarios al alcance de la red tanto en radio de cobertura del centroide (punto de acceso AP) como de capacidad de conexiones del dispositivo, propiciando de esta manera la convergencia de conexión entre los usuarios y el centroide, comparando la menor distancia con el resto de distancias calculadas y tomándola como base para agrupar a los elementos cuya distancia hacia el centroide sea similar o aproximada a la distancia base al mismo tiempo que calcula la localización del centroide.

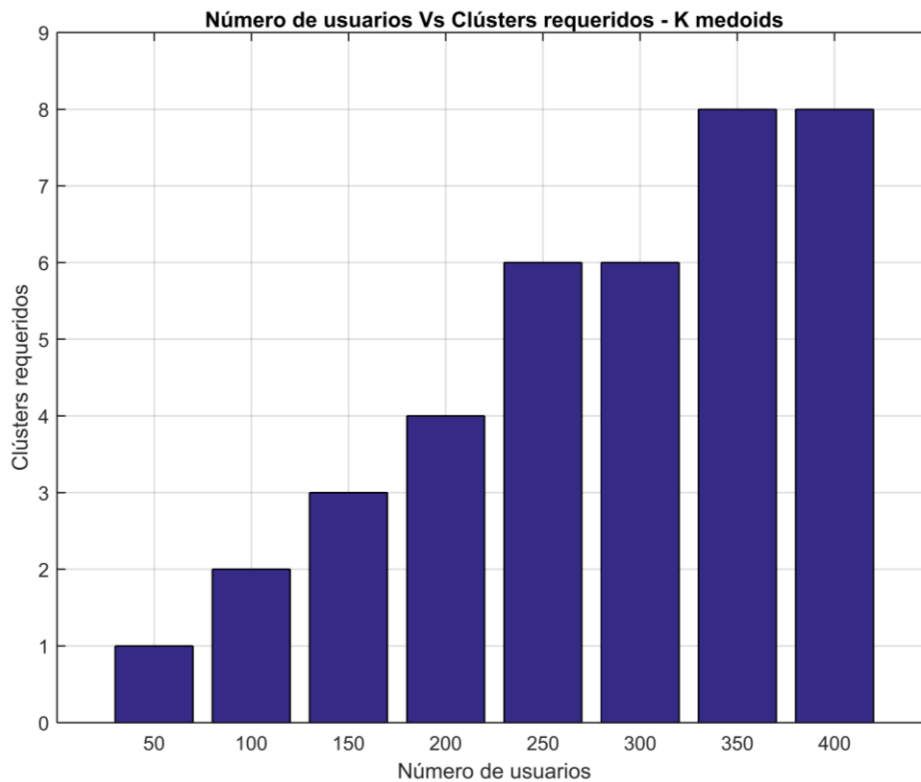


Figura 6. Agrupaciones requeridas en cada escenario representado por el número de usuarios para el método K means

En la figura 6 se muestra el comportamiento del algoritmo K medoids en las mismas condiciones que el algoritmo anterior, es decir, iguales escenarios, iguales restricciones de abarcar al 100 % de usuarios, buscar el mínimo número de agrupaciones, que las agrupaciones se realicen en base al radio de cobertura y número máximo de usuarios que el dispositivo es capaz de aceptar, etc.

Como se puede apreciar en la gráfica y comparándola con el algoritmo anterior, después de los 200 usuarios el número de agrupaciones requeridas se estabilizan, es decir, ya no hay mayor variación entre un escenario y otro a diferencia del método K means.

Para este método la ubicación de los puntos de acceso AP se da en el mismo sitio que el nodo acumulador. Podemos así ver que en K medoids se busca la ubicación del usuario más céntrico al grupo, y sugiere que en ese lugar sea instalado el punto de acceso de toda esa red.

La diferencia principal entre K-means y K medoids es que se muestran igual número de clústers pero diferente forma de agrupamiento, es decir, tenemos clústers similares en ubicación pero distinta cantidad de usuarios por clúster. Ahora bien los dos métodos tienen la singularidad de que se busca tener un 100 % de cobertura, es decir, ningún usuario es excluido del proceso de clusterización.

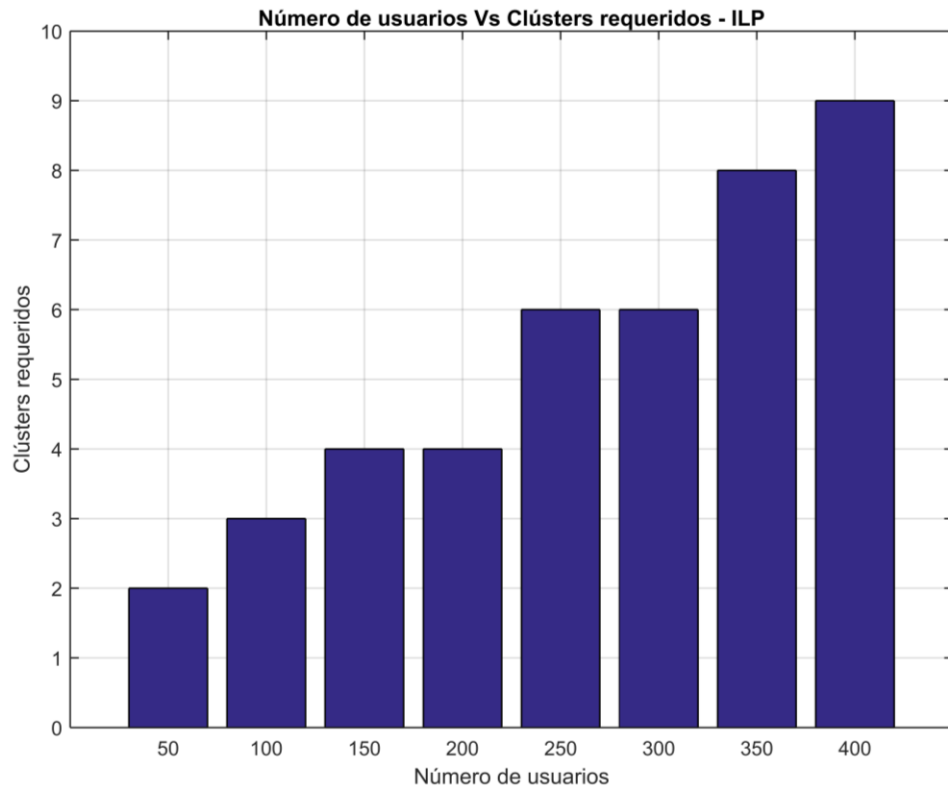


Figura 7. Agrupaciones requeridas en cada escenario representado por el número de usuarios para el método K means

En la figura 7 se aprecia un método más complejo y que abarca un mayor número de restricciones, para este caso se seleccionaron las posibles localizaciones de los puntos de acceso AP, para que la optimización sea la que arroje de entre estos sitios candidatos, la mejor localización para satisfacer las condiciones ya mencionadas.

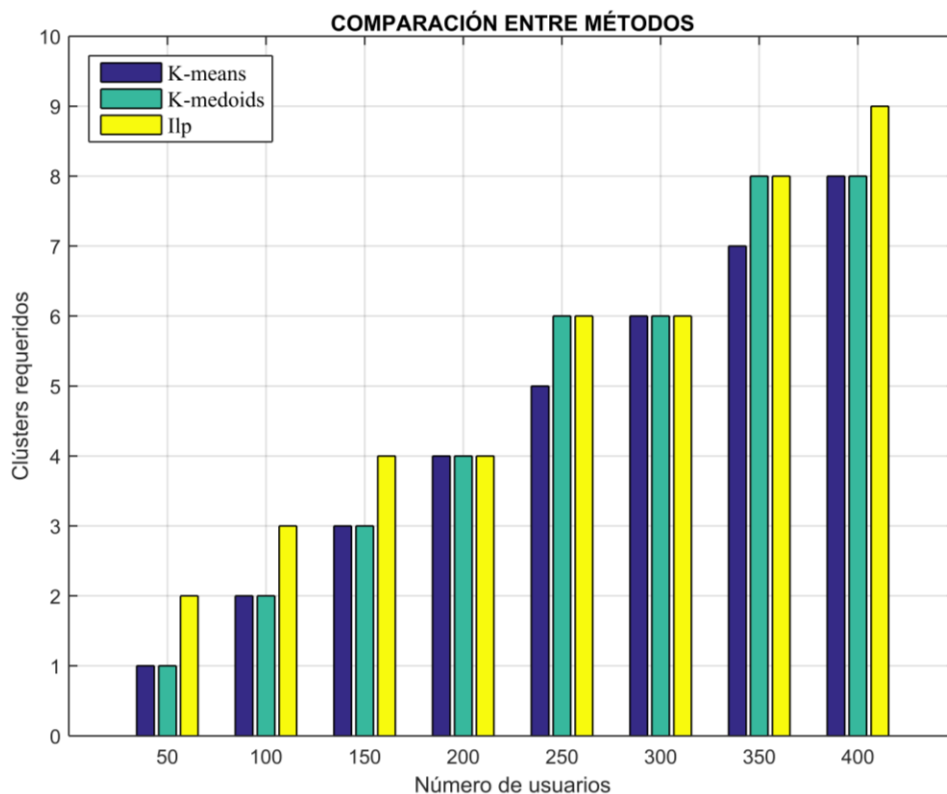


Figura 8. Gráfica comparativa entre métodos de agrupación

En la Figura 8 se muestra una comparación entre métodos cuyos parámetros de análisis son el número de usuarios y el número de agrupaciones mínimas que requiere cada método para cumplir con todas las restricciones planteadas. Se puede apreciar que el método que menor número de agrupaciones requiere realizar es K-means, por lo que se puede asociar a este método la reducción de costos por los motivos explicados anteriormente, tales como costos por adquisición de dispositivos, herramientas y materiales, costos de instalación, configuración, construcción de estructuras de soporte, etc.

En la siguiente gráfica, se puede apreciar una comparación entre los métodos de agrupación en cuanto a la equidad en la distribución de los usuarios en cada clúster, es decir, que todos los grupos tengan un número similar de medidores inteligentes con el fin de que todos los grupos funcionen de una forma parecida, sin sobrecargar algunos puntos de acceso ni subcargar otros.

Para este análisis se han considerado 8 escenarios distintos para cada método, cada escenario tiene 50 medidores inteligentes más que el escenario anterior, de manera que el escenario 1 tiene 50 usuarios, el 2 tiene 100 usuarios, y así sucesivamente, obteniendo para cada escenario la distribución de medidores inteligentes en cada agrupación. Al comparar dicha distribución para cada escenario usando los diferentes métodos observamos que todos tienen una distribución similar, y que el número de usuarios

abarcados en cada grupo es similar, es decir, es simétrica en cada método, pero al tratarse de escenarios mayores a 100 usuarios, la distribución mencionada cambia totalmente.

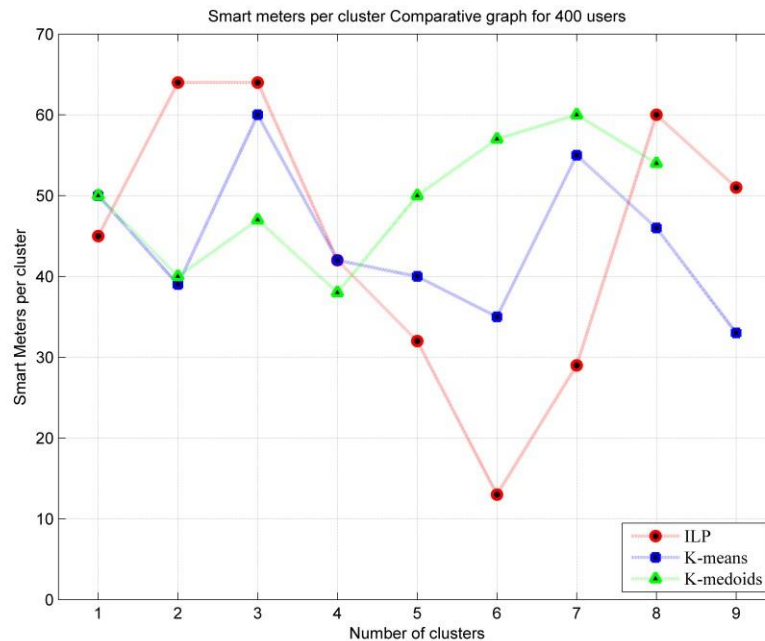


Figura 9. Equidad en la distribución de SM en los diferentes clústers

La figura 9 simula un escenario de 400 medidores inteligentes, y muestra el comportamiento de cada uno de los métodos de agrupación a medida que va realizando las agrupaciones. Se puede apreciar cuantos medidores inteligentes hay en cada grupo según el método de clusterización y las curvas indican qué método tiene una distribución más uniforme en cuanto a medidores inteligentes por cada agrupación, concluyendo que el método cuya conducta agrupa de mejor manera a los medidores, es decir, sin congestionar ciertas agrupaciones es K-medoids, cuyos grupos son similares en tamaño y presenta menos picos en la curva descrita por la misma figura. Por congestiónamiento se entiende al mayor número de elementos en un grupo que generan mayor tráfico de información intercambiada simultáneamente que puede ocasionar pérdida de datos, incremento de tiempo en las comunicaciones, o incluso colapsar al punto de acceso por la cantidad de información transmitida que no es soportada por el dispositivo.

Establecida la muestra de estudio (medidores inteligentes) a través de los diferentes escenarios anteriormente vistos, obtuvimos una tabla con el tiempo total en el que cada método realiza las

agrupaciones, tanto en las iteraciones para hallar la distancia mínima entre cada usuario SM y el punto de acceso AP, pudiendo notar que en el caso de ILP, el tiempo supera al tiempo del resto de métodos utilizados, y esto se debe a la cantidad de restricciones obtenidas en cada caso, por citar un ejemplo, para los 400 medidores del último escenario existen 6817 restricciones con 6816 variables dadas por las condiciones de capacidad de albergar medidores de cada AP, por el radio de cobertura establecido, por la distancia más cercana en un medidor y un AP, entre otras, mientras que K-means y K-medoids realizan las agrupaciones según la distancia entre medidores y calculan un centroide o medoide en el que se localizará el AP en base a dicha distancia obteniendo un punto casi céntrico para cada agrupación. El método que utiliza un menor promedio de tiempo para la clusterización es K-means, seguido de K-medoids, y por último se ubica el método basado en ILP.

TIEMPO REQUERIDO [segundos]									
USUARIO MÉTODO	50	100	150	200	250	300	350	400	Promedio de tiempo requerido
ILP	0,143	0,465	3,008	5,214	10,076	11,711	24,6	36,848	11,508125
K-means	0,2113	0,4599	0,8355	1,3588	2,2133	3,1241	4,11346	5,29931	2,201955
K-medoids	0,2718	0,5206	0,8980	1,4206	2,2804	3,1846	4,1750	5,3598	2,2638545

Tabla 5. Tiempos utilizados por cada algoritmo para clusterizar.

5. RESULTADOS ESPERADOS

1. Planeación óptima y escalable para el despliegue de redes de distribución eléctrica en área urbana y rural en Smart Grid.
2. Varios modelos matemáticos que representen y solucionen el problema planteado.
3. Modelos de optimización bajo escenarios no convexos.
4. Comparación de métodos para encontrar el algoritmo más eficiente tomando en cuenta varios criterios.
5. Heurística que tenga en cuenta los diferentes escenarios para el despliegue de una red de distribución eléctrica.

6. ESTRATEGIA PARA LA DIVULGACIÓN DE LOS RESULTADOS

Dentro de las estrategias de divulgación se plantean las siguientes:

1. Informe escrito final como producto de la tesis. El informe será entregado a biblioteca UPS
2. Jornada Científica de Ingeniería Eléctrica.

7. SECTORES BENEFICIADOS

Los sectores beneficiados con el proyecto son los siguientes:

1. Universidad Politécnica Salesiana
2. Grupos de investigación relacionados con el proyecto
3. Sectores públicos y privados relacionados al tema de investigación
4. Áreas urbanas con alta y media densidad poblacional que cuenten con el servicio de energía eléctrica
5. Áreas rurales con mediana densidad poblacional que cuenten con el servicio de energía eléctrica donde sea propicio establecer redes inalámbricas, es decir, que no tenga objetos que distorsionen la información de los medidores.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En las redes inteligentes, es de vital importancia la optimización de recursos, es decir, propiciar en lo posible las mejores condiciones de trabajo en los sistemas a estudiar, al mismo tiempo que reducir los costos, espacio físico e ítems a implantar, es por esto que el desarrollo de nuestro caso de estudio mediante la optimización de puntos de acceso dentro una red de comunicación inteligente Smart grid sugiere reducir el número de estaciones base o AP ubicadas dentro de un área específica que permita abastecer un número de usuarios definido, los resultados de la problemática presentada desencadenaron en la reducción de la cantidad de puntos de acceso a instalar, produciendo como consecuencia la reducción del costo de la infraestructura a implementar dentro de esta red de comunicación.

El algoritmo matemático usado es una recopilación y conjunción de otros algoritmos tales como K-means para la clusterización, cálculos de distancias de Haversine para convertir las coordenadas rectangulares correspondientes a la ubicación de medidores inteligentes y puntos de acceso en coordenadas geo-referenciadas con el fin de tener ubicaciones reales en un mapa, y un algoritmo de optimización simplex que facilitaron la resolución de un problema complejo y obtener resultados factibles en función de las restricciones requeridas.

El tiempo de cómputo dependerá además de las características del procesador del ordenador, en gran parte del número de restricciones que tenga el problema a analizar, cada usuario que se sume al estudio implica un mayor número de restricciones y ecuaciones, por lo que la complejidad de un problema a optimizar dependerá también del número de usuarios inmersos en el problema de optimización.

El estudio desarrollado a lo largo del documento permite tener una idea de cómo dimensionar una red de medidores inalámbricos desde un punto de vista diferente. Según los resultados arrojados por las simulaciones computacionales, el método más eficiente en cuestión de distribución simétrica de usuarios en cada agrupación es K-medoids, que no presenta tantos altibajos al momento de la distribución,

mientras que en el uso de menor cantidad de agrupaciones requeridas y menor tiempo, el algoritmo más eficiente es k-means, convirtiéndolo en el mejor método a aplicar para este caso de estudio por tener mejores resultados que los otros algoritmos y mostrando menor cantidad de grupos.

Se recomienda probar otros algoritmos de agrupación y someterlas a las mismas condiciones, en los mismos escenarios, para tener una visión más amplia de dichos algoritmos, la importancia que tienen las redes inalámbricas para cualquier uso, y la confiabilidad de los algoritmos cuando se plantean escenarios grandes y con mayor densidad poblacional. Además se plantea incluir en las restricciones la interferencia, que se da cuando más de un radio de cobertura tienen uno o varios medidores en común, dando lugar a lapsos de interferencia e interrupción de información por el exceso de fuentes de comunicación pudiendo afectar la veracidad de los datos comunicados y con esto significar pérdidas para las empresas distribuidoras que se ven reflejadas en dinero que no podrán recuperar. Por ello es importante abarcar la mayor cantidad de restricciones para descartar posibles errores y factores que afectan directamente a la red, a las empresas y a los consumidores de energía eléctrica.

9. REFERENCIAS

- [1] A. Weigel, C. Renner, V. Turau, H. Ernst, and N. Weg, "Wireless Sensor Networks for Smart Metering," pp. 722–729, 2014
- [2] G. Souza, F. V. Mestrando, C. Lima, G. Júnior, M. Castro, and A. E Sergio, "Optimal positioning of GPRS concentrators for minimizing node hops in smart grids considering routing in mesh networks," *2013 IEEE PES Conf. Innov. Smart Grid Technol. ISGT LA 2013*, 2013.
- [3] R. S. Elhabyan and M. C. E. Yagoub, "WEIGHTED TREE BASED ROUTING AND CLUSTERING PROTOCOL FOR WSN," *IEEE Can. Conf. Electr. Comput. Eng.*, 2013.
- [4] K. Ab-Hamid, C. E. Tan, and S. P. Lau, "Self-sustainable energy efficient long range WiFi network for rural communities," *2011 IEEE GLOBECOM Work. GC Wkshps 2011*, no. RuralComm, pp. 1050–1055, 2011.
- [5] M. Y. Asitimbay Regalado and I. P. González Cabrera, "Análisis de la calidad de servicio de las tecnologías CDMA 450 y Wimax para la comunicación en las parroquias rurales de los cantones Azogues, Cañar y Déleg brindado por la Corporación Nacional de Telecomunicaciones sucursal Cañar," 2010.
- [6] R. Ratasuk, S. Iraraji, K. Hugl, L. Wang, and A. Ghosh, "Performance of low-cost LTE devices for advanced metering infrastructure," *IEEE Veh. Technol. Conf.*, pp. 1–5, 2013
- [7] E. Inga, G. Arévalo, and R. Hincapié, "Optimal Deployment of Cellular Networks for Advanced Measurement Infrastructure in Smart Grid," *Commun. Comput. (COLCOM), 2014 IEEE Colomb. Conf.*, 2014.
- [8] T. Cheng Jen and D. Miao Ru, "Obtaining forewarning time for landslides using AMI associated wireless sensor network," *Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf. APPEEC*, 2010.
- [9] J. Zheng, D. W. Gao, and L. Lin, "Smart meters in smart grid: An overview," *IEEE Green Technol. Conf.*, pp. 57–64, 2013.
- [10] L. Li, X. Hu, K. Chen, and K. He, "The applications of WiFi-based Wireless Sensor Network in Internet of Things and Smart Grid," *Proc. 2011 6th IEEE Conf. Ind. Electron. Appl. ICIEA 2011*, pp. 789–793, 2011.
- [11] J. Koo and H. Cha, "Unsupervised locating of WiFi access points using smartphones," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part C Appl. Rev.*, vol. 42, no. 6, pp. 1341–1353, 2012.

- [12] R. Dubey and S. Sharma, "Distributed Shared Spectrum Techniques for Cognitive Wireless Radio Networks," *2010 Int. Conf. Comput. Intell. Commun. Networks*, pp. 259–264, Nov. 2010.
- [13] R. A. Saeed and S. J. Shellhammer, Eds., *TV White Space Spectrum Technologies: Regulations, Standards, and Applications*, 1 edition. Boca Raton, FL: CRC Press, 2011.
- [14] O. Fatemieh and R. Chandra, "Low Cost and Secure Smart Meter Communications using the TV White Spaces," pp. 37–42, 2010.
- [15] L. P. J. David, "Estándares inalámbricos 802.11." Slideshare, 2012.
- [16] Cisco, "Puntos de acceso inalámbrico Cisco Small Business de la serie 500," *Conectividad Wireless-n*, pp. 1–9, 2013.
- [17] R. C. Das, P. P. Purohit, T. Alam, and M. Chowdhury, "Location Based ATM Locator System Using OpenStreetMap," 2014.
- [18] F. Medhat, R. a. Ramadan, and I. Talkhan, "Smart clustering for multimodal WSNs," *Proc. - 2012 7th Int. Conf. Broadband, Wirel. Comput. Commun. Appl. BWCCA 2012*, pp. 367–372, 2012.
- [19] P. Sasikumar and S. Khara, "K-Means Clustering in Wireless Sensor Networks," *2012 Fourth Int. Conf. Comput. Intell. Commun. Networks*, pp. 140–144, 2012.
- [20] S. Nithyakalyani, "Data Aggregation in Wireless Sensor Network Using Node Clustering Algorithms - a Comparative Study," *Proc. 2013 IEEE Conf. Inf. Commun. Technol. (ICT 2013)*, no. Ict, pp. 508–513, 2013.
- [21] M. Amoroso, H. Ávila, and G. Peralta, "Aplicación de las técnicas de agrupamiento para la distribución cuasi-óptima de una red híbrida WDM-TDM/PON en cascada multinivel que da soporte a una Smart Grid o Smart City," Salesian Polytechnic University - Cuenca, Ecuador, 2015.
- [22] V. Tran-Quang, P. N. Huu, and T. Miyoshi, "Adaptive transmission range assignment algorithm for in-routing image compression on wireless sensor networks," *Commun. Electron. (ICCE), 2010 Third Int. Conf.*, pp. 18–23, 2010.
- [23] X. Jinhua and L. Hong, "Web User Clustering Analysis based on Kmeans Algorithm," pp. 6–9, 2010.
- [24] X. Zhang, W. Ding, J. Wang, Z. Fan, and G. Deng, "Spatial Clustering with Obstacles Constraints Using PSO-DV and K-Medoids," pp. 2–7, 2008.
- [25] K. Nagothu, S. Member, B. Kelley, S. Member, and M. Jamshidi, "Persistent Net-AMI for Microgrid Infrastructure Using Cognitive Radio on Cloud Data Centers," vol. 6, no. 1, pp. 4–15, 2012.
- [26] M. Kim and S. Yoo, "Distributed Coordination Protocol for Ad Hoc Cognitive Radio Networks," vol. 14, no. 1, pp. 51–62, 2012.
- [27] D. Bian, M. Kuzlu, M. Pipattanasomporn, and S. Rahman, "Analysis of Communication Schemes for Advanced Metering Infrastructure (AMI)," pp. 14–18, 2014.
- [28] N. Zaker, B. Kantarci, M. Erol-kantarci, and H. T. Mouftah, "Smart grid monitoring with service differentiation via EPON and wireless sensor network convergence," *Opt. Switch. Netw.*, vol. 14, pp. 53–68, 2014.
- [29] A. Mahmood, I. Khan, S. Razzaq, Z. Najam, N. A. Khan, M. A. Rehman, and N. Javaid, "Home Appliances Coordination Scheme for Energy Management (HACS4EM) using Wireless Sensor Networks in Smart Grids," *Procedia - Procedia Comput. Sci.*, vol. 32, pp. 469–476, 2014.
- [30] J. Jeon, Y. Kong, and Y. Kwon, "International Journal of Electronics and Communications (AEÜ) MST-based topology control with NLOS location error compensation for location-aware networks," *AEUE - Int. J. Electron. Commun.*, vol. 68, no. 9, pp. 835–840, 2014.
- [31] M. Younis, I. F. Senturk, K. Akkaya, S. Lee, and F. Senel, "Topology management techniques for tolerating node failures in wireless sensor networks : A survey," *Comput. Networks*, vol. 58, pp. 254–283, 2014.
- [32] N. Huu, P. Ngoc, T. Thu, and T. Ngoc, "Simulation Modelling Practice and Theory Modeling

- and experimenting combined smart sleep and power scaling algorithms in energy-aware data center networks,” *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 39, pp. 20–40, 2013.
- [33] A. E. Jahromi and Z. B. Rad, “Sharif University of Technology Optimal topological design of power communication networks using genetic algorithm,” *Sci. Iran.*, vol. 20, no. 3, pp. 945–957, 2013.
- [34] M. R. Abid, A. Khallaayoun, H. Harroud, R. Lghoul, M. Boulmalf, and D. Benhaddou, “A Wireless Mesh Architecture for the Advanced Metering Infrastructure in Residential Smart Grids,” *2013 IEEE Green Technol. Conf.*, pp. 338–344, Apr. 2013.
- [35] G. Mauri, D. Moneta, C. Bettoni, and C. Ricerca, “Energy conservation and smartgrids : new challenge for multimetering infrastructures,” pp. 1–5, 2009.
- [36] G. Naik, S. Singhal, A. Kumar, and A. Karandikar, “Quantitative Assessment of TV White Space in.”